



Universidad Pablo de Olavide

ESCUELA DE DOCTORADO

**Programa de Doctorado en Ciencias de la Actividad
Física y del Deporte**

TESIS DOCTORAL

**“EVOLUCIÓN DE LA CARGA DE ENTRENAMIENTO Y LOS
INDICADORES DE FUERZA, VELOCIDAD Y POTENCIA
AERÓBICA Y ANAERÓBICA A LO LARGO DE CUATRO
TEMPORADAS DE UN CORREDOR DE MEDIO-FONDO DE
ALTO NIVEL”**

Tesis doctoral presentada por:
Luis Alberto Marco Contreras

Director
Dr. Juan José González Badillo

Sevilla, Mayo de 2021



Universidad Pablo de Olavide

ESCUELA DE DOCTORADO

**Programa de Doctorado en Ciencias de la Actividad
Física y del Deporte**

TESIS DOCTORAL

**“EVOLUCIÓN DE LA CARGA DE ENTRENAMIENTO Y LOS
INDICADORES DE FUERZA, VELOCIDAD Y POTENCIA
AERÓBICA Y ANAERÓBICA A LO LARGO DE CUATRO
TEMPORADAS DE UN CORREDOR DE MEDIO-FONDO DE
ALTO NIVEL”**

Doctorando

Director

Sevilla, Mayo de 2021

*A mi familia,
por su apoyo incondicional.*

AGRADECIMIENTOS

A Juan José González Badillo por todo lo que me has enseñado a lo largo de los años, desde la asignatura de “Bases del Acondicionamiento Físico” del curso 2004/2005 hasta la actualidad. Por la paciencia y por la humildad y el tiempo dedicado a enseñarme una pequeña parte del conocimiento que posees. También por mostrarme la importancia de ser riguroso si se quiere avanzar en este conocimiento y por haber guiado mis pasos en los últimos años. Plantearme hacer una tesis doctoral es algo que probablemente no hubiese ocurrido sin haberte conocido y llevarla a cabo, tampoco hubiera sido posible sin tu inestimable ayuda dándole sentido a esta idea.

A Isabel, con la que llevo compartiendo los últimos 14 años de mi vida y que ha visto y soportado todo este proceso y otros tantos. Por su apoyo incondicional y por ayudarme a seguir consiguiendo objetivos en la vida, muchos de ellos mutuos. Por darme a lo más importante que tengo en esta vida y por entender que la felicidad de cada uno es la de los dos.

A Leo, porque aunque todavía no lo entienda, algunas horas que papá no ha podido estar jugando han tenido un motivo. Por ser una motivación en el día a día y ser un orgullo para tu padre.

A mi madre Isabel, por ser la mejor madre que se puede tener. Por el apoyo constante a las decisiones que he ido tomando en la vida, por hacerme ver que hasta en los peores momentos hay algo que merece la pena y que el éxito en la vida es la salud y la felicidad.

A mi padre Javier que me inculcó la importancia de formarme, a recordarme que la vida es un camino de piedras que hay que ir sorteando y que la experiencia es un grado. También por el recordatorio constante para que finalizara esta tesis doctoral “no lo dejes”. Gracias papá, por fin puedo decir que “no lo he dejado”.

A mi hermano Javi, por su ayuda a cualquier solicitud que te he hecho, porque aunque sé que a veces no te apetece, siempre acabas arrimando el hombro a cualquier cosa que te pido.

Al resto de mi familia, especialmente a mi tío José Ángel y Guadalupe, por preocuparse e interesarse siempre por mí.

A mi entrenador Paco Gil, por todos estos años de compañía, por tu tiempo y dedicación, porque como ya dije en su momento, es algo que jamás se recupera.

A Beatriz Bachero, por su amistad durante tantos años y por su ayuda inestimable en esta tesis doctoral, así como en los estudios que se han llevado a cabo durante ella.

A David Rodríguez, cuyo alias en algún momento que no voy a mencionar fue “Steven Seagal” por su amistad y por su ayuda ante cualquier consulta todo este tiempo. También por su implicación directa en el desarrollo de esta tesis doctoral.

A mis compañeros en la facultad y en el CIRF de la UPO: Fernando Pareja, Ricardo Mora y Juanma Yáñez por su ayuda en la realización de los test de esta Tesis.

A la universidad Pablo de Olavide, por permitirme completar todo el proceso en la educación: licenciatura, máster y ahora doctorado.

A la universidad San Jorge de Zaragoza, por darme la oportunidad de iniciarme en la carrera académica y a todos los compañeros que de alguna forma me han apoyado estos años.

A todos mis amigos, atletas, compañeros de trabajo que no puedo mencionar pero que directa o indirectamente han colaborado en este proceso.

Muchas gracias a todos.

PUBLICACIONES Y DIVULGACIÓN DE RESULTADOS

La realización de esta tesis doctoral ha permitido la publicación de un artículo y la realización de varias aportaciones a congresos.

Artículo publicado en revista científica internacional (JCR):

- **Marco-Contreras, L. A.**, Bachero-Mena, B., Rodríguez-Rosell, D., & González-Badillo, J. J. (2021). Load Index and Vertical Jump to Monitor Neuromuscular Fatigue in an Elite 800-m Athlete. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1–5. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0474>

Comunicaciones presentadas en formato póster:

- **Marco-Contreras, L.A.**, Rodríguez-Rosell, D., Bachero-Mena, B. González-Badillo, J.J. Training load and vertical jump evolution during a full season in a high-level 800m-runner. IX International Symposium in Strength Training. Faculty of Physical Activity and Sport Sciences (INEF). Madrid. Spain. 16-17 December 2016.
- **Marco-Contreras, L.A.**, Bachero-Mena, B. González-Badillo, J.J. Comparison of maximal aerobic speed obtained in a treadmill or a track test in middle-distance women runners. XII International Symposium in Strength Training & Ironfemme study/ I NSCA Spain National Conference. Faculty of Physical Activity and Sport Sciences (INEF). Madrid. Spain. December 2019.
- **Marco-Contreras, L.A.**, Bachero-Mena, B. González-Badillo, J.J. Analysis of the maximal speed obtained in a incremental test in middle-distance men runners of national and international level over two different surfaces: a motorised treadmill and athletic track test. Annual Congress of the European College of Sport Sciences (ECSS). Online. Octubre 2020.

ÍNDICE

RESUMEN.....	13
GLOSARIO DE ACRÓNIMOS.....	16
1. INTRODUCCIÓN.....	18
1.1. Descripción de la prueba	18
1.2. Requerimientos energéticos de la prueba.....	19
1.3. Diferencias en el rendimiento entre pruebas de laboratorio y campo	25
1.4. Cuantificación del entrenamiento.....	27
1.5. Control de la carga mediante el salto vertical	30
2. PROBLEMA	33
3. OBJETIVO.....	33
4. HIPÓTESIS.....	34
5. METODOLOGÍA	37
5.1. Estudio Preliminar.....	37
Tipo de investigación	37
Muestra	37
Diseño del estudio	38
Variables objeto de estudio	38
Evaluaciones y pruebas físicas	40
Análisis estadístico.....	43
5.2. Estudio principal.....	44
Tipo de investigación	44
Muestra	44
Variables objetos de estudio.....	45
Evaluaciones y pruebas físicas	47
Procedimientos	51
1.1.1. Registros continuos.....	51
1.1.2. Registros periódicos.....	52
Entrenamiento	55
Análisis estadístico.....	56
6. RESULTADOS	59
6.1. Estudio preliminar	59
6.2. Estudio principal.....	60
Variables analizadas.....	60
Efectos de la carga de entrenamiento en la sesión sobre la pérdida de salto vertical	62

Efecto de la carga de entrenamiento en la sesión sobre la recuperación de la capacidad de salto	64
Efecto de la carga de entrenamiento semanal sobre distintas variables	67
Cambios en el rendimiento a lo largo de todo tiempo analizado.....	69
Evolución de distintas variables previas al mejor y peor resultado en los test	73
7. DISCUSIÓN.....	80
Diferencias en el rendimiento entre distintas superficies	80
Efectos de la carga de entrenamiento sobre el salto vertical	83
Descripción de la evolución del rendimiento	91
8. CONCLUSIONES	97
9. APLICACIONES PRÁCTICAS.....	100
10. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	102
11. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	105
12. BIBLIOGRAFÍA.....	107
13. RELACIÓN DE TABLAS Y FIGURAS	128
14. ANEXOS.....	133
Anexo 1.	133
Anexo 2.	134
Anexo 3.	135

RESUMEN

Evolución de la carga de entrenamiento y los indicadores de fuerza, velocidad y potencia aeróbica y anaeróbica a lo largo de cuatro temporadas de un corredor de medio-fondo de alto nivel

El entrenamiento en deportistas de competición de alto nivel supone un desafío para entrenadores e investigadores. La necesidad de encontrar explicación al rendimiento de los deportistas y conocer en qué grado de modificación de las variables de entrenamiento pueden conseguirse los mejores resultados, hacen que en las últimas décadas se haya incrementado el interés en el estudio de las variables fisiológicas y mecánicas determinantes del rendimiento en muchas especialidades deportivas. En relación con la carrera, este análisis se ha centrado principalmente en pruebas de larga duración y en pruebas de corta duración, con menos atención a pruebas de media duración. Uno de los principales desafíos de entrenadores e investigadores es conocer la carga más adecuada a aplicar a los deportistas de diferentes especialidades para obtener el mejor rendimiento y conocer el efecto que producen estas cargas sobre ellos. La presente tesis doctoral tiene como objetivo analizar la evolución de la carga de entrenamiento y su relación con los indicadores de fuerza, velocidad y potencia aeróbica y anaeróbica en un corredor de 800 metros de alto nivel.

Dada la complejidad de los factores determinantes del rendimiento en este tipo de deportistas donde los esfuerzos están caracterizados por la contribución de los sistemas aeróbicos y anaeróbicos (Hill, 1999; Spencer & Gatin, 2001), controlar la carga de entrenamiento y su efecto en el deportista es esencial para entender las respuestas del deportista y minimizar el riesgo de sobre-entrenamiento (Bourdon et al., 2017; Iñigo Mujika, 2017). El salto vertical con contramovimiento (CMJ) ha mostrado ser una herramienta eficiente y rápida para evaluar la fuerza en los miembros inferiores. El CMJ ha mostrado también ser un test válido y sensible a la fatiga producida por las sesiones de entrenamiento (Gathercole, Sporer, Stellingwerff, & Sleivert, 2015; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011b). En la presente tesis doctoral se evaluó de manera continua el salto vertical antes y después de cada sesión de entrenamiento de carrera durante 4 temporadas deportivas. Además, se cuantificó la carga de entrenamiento mediante un

índice de carga (IC), compuesto por el producto del volumen y la intensidad de entrenamiento, y se registró un indicador subjetivo de condición física (VSCF). Para controlar la evolución del rendimiento del deportista, se establecieron una serie de pruebas periódicas de valoración de la condición física (test de fuerza, test de 20 m, test de 300 m y test de velocidad aeróbica máxima y tiempo límite) a lo largo de diferentes temporadas. Por último, se analizó la evolución del IC y del salto vertical con los indicadores de rendimiento del deportista. Como estudio complementario, se analizaron las diferencias en el rendimiento

Se encontró una relación negativa significativa entre el IC de la sesión y la pérdida de CMJ en ella. Además, también se encontró una relación negativa con el CMJ a las 24 horas de la sesión, siendo esta relación dependiente del valor de IC, encontrando una relación positiva hasta valores de 8 y negativa a partir de este valor. Se analizó la relación entre el IC medio semanal con el CMJ inicial medio semanal y con el CMJ inicial de la semana posterior encontrando de nuevo la misma relación negativa. El CMJ mostró una relación positiva significativa con los valores de VSCF en todas las temporadas. La evolución de la carga de entrenamiento fue mayor y con una tendencia a aumentar en las 4 semanas previas al mejor resultado en las pruebas de VAM y tiempo límite. Por el contrario, cuando se alcanzó el peor resultado en estas pruebas, los valores y la evolución eran opuestos. Al analizar estas mismas variables en las 4 semanas previas a los mejores resultados en las pruebas de 20 y 300 m y a las semanas de mejor CMJ medio, se encontraron valores de IC menores y con tendencia a disminuir progresivamente que cuando se alcanzaron los peores resultados. La evolución del CMJ mostró una tendencia a aumentar sus valores las 4 semanas previas al mejor resultado de cualquier test y a la semana de peor de CMJ medio semanal. Además, se encontraron relaciones significativas entre los valores de fuerza y el rendimiento en los test de VAM, tiempo límite, 20 y 300 m.

Nuestros resultados indican que el CMJ es un buen indicador de la evolución de la condición física del deportista y del efecto de la magnitud de la carga sobre éste. El CMJ es un buen indicador del estado físico del deportista previo a la realización de un entrenamiento o competición.

Glosario de Acrónimos

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS

Acrónimo	Significado
AL	Aire libre
CMJ	Salto vertical con contramovimiento
CMJ24h	CMJ inicial a las 24 horas
CMJc	Salto con cargas
CMJpérdida	Pérdida de CMJ
CMJpost	CMJ final
CMJpre	CMJ inicial
CMJpre_ss	CMJ inicial de la semana siguiente
CMJpresem	CMJ inicial medio semanal
DJ	Drop jump
DT	Desviación típica
ECO	Escala objetiva de esfuerzo
FC	Frecuencia cardíaca
FCmáx	Frecuencia cardíaca máxima
IAAF	Federación Internacional de Atletismo
IC	Índice de carga
ICsemanal	Índice de carga medio semanal
Kg	Kilogramos
km·h⁻¹	Kilómetros por hora
l	litro
m	Metro
min	minuto
mmoles	Milimoles
PB	Press Banca
PC	Pista cubierta
Post	Posterior al test
ppm	Pulsaciones por minuto
Pre	Previo al test
RPE	Tasa de esfuerzo percibido
SJ	squat jump
Tlímite	Tiempo límite
TRIMP	Impulsos de entrenamiento
VAM	Velocidad aeróbica máxima
VC	Velocidad de competición
Vmáx	Velocidad máxima
VMP	Velocidad media propulsiva
VO₂	Consumo de oxígeno
VO₂max	Consumo de oxígeno máximo
VSCF	Valoración subjetiva de la condición física

Introducción

1. INTRODUCCIÓN

1.1.Descripción de la prueba

Las carreras de 800 y 1500 metros son algunas de las pruebas incluidas en el programa olímpico dentro de la modalidad de atletismo. En la clasificación habitual de las carreras están encuadradas en la especialidad de medio-fondo. En concreto, la prueba de 800 m consiste en realizar dos vueltas a una pista de 400 m (pista de aire libre) o 4 vueltas a una pista de 200 m (pista cubierta) en el menor tiempo posible. En ambos casos, los atletas recorren la primera curva por calles (100 m en las pistas de 400 m y 50 m en las pistas de 200 m) antes de tomar la “calle libre”, donde pasan a correr cerca del borde interior de la pista conocido como “cuerda”.

La prueba de 800 metros se encuentra dentro del programa olímpico actual, pero su inclusión ocurrió en diferentes momentos para cada uno de los sexos. La prueba masculina forma parte de este evento desde la primera edición de los Juegos Olímpicos modernos en Atenas (1896), sin embargo, la prueba femenina apareció por primera vez en los Juegos Olímpicos de Ámsterdam (1928). No fue hasta los Juegos Olímpicos de Roma (1960) cuando se consolidó en el programa que permanece hasta la actualidad.

La estrategia de carrera ha sido otro factor estudiado en la prueba de 800 m dentro del análisis de los factores determinantes del rendimiento en cuanto a la competición se refiere. La estrategia de carrera representa la gestión del ritmo o velocidad de carrera que el deportista hace durante una prueba y que se aplica a pruebas con una distancia definida que debe ser cubierta lo más rápidamente posible, regulando la tasa de gasto energético que emplea el deportista en cada momento (Foster, Schrager, Snyder, & Thompson, 1994). Esta gestión del ritmo podría ser un marcador de regulación fisiológica subyacente que busca evitar una fatiga prematura en el deportista (Tucker & Noakes, 2009) y una forma de optimizar el rendimiento (Foster et al., 2004), influida por la propia información de los sistemas fisiológicos (de Koning et al., 2011), la experiencia previa del deportista y factores externos como la presencia de rivales o la distancia hasta meta (Hettinga, Konings, & Pepping, 2017; Renfree & Casado, 2018; Smits, Pepping, & Hettinga, 2014; St Clair Gibson et al., 2006; Thiel, Foster, Banzer, & De Koning, 2012). La colocación que adopta el deportista durante la prueba puede ser determinante en el resultado de esta, ya que un corredor podría finalizar en peor posición que otro con menor velocidad media por recorrer mayor distancia durante la prueba (Jones & Whipp, 2002), ya que las

diferencias entre corredores son extremadamente pequeñas (Hanley & Hettinga, 2018). Además, la posición y la dispersión entre corredores en distancias parciales de la prueba parecen estar relacionadas con la posibilidad de finalizar entre las tres primeras posiciones (Casado & Renfree, 2018; González-Mohino, Del Cerro, Renfree, Yustres, & González-Ravé, 2020; Hanley & Hettinga, 2018; Renfree, Mytton, Skorski, & Clair Gibson, 2014). En pruebas de duración similar a la prueba de 800 m masculina, un ritmo inicial alto podría mejorar el rendimiento a pesar de un descenso de la velocidad de carrera en la parte final de esta (Sandals, Wood, Draper, & James, 2006; R. Tucker & Noakes, 2009). De hecho, en la mayoría de pruebas de 800 m donde se busca conseguir el mejor tiempo posible, los atletas adoptan una estrategia denominada en “positivo” (Abbiss & Laursen, 2008), caracterizada por una primera vuelta a un ritmo mayor que la segunda (Casado, Hanley, Jiménez-Reyes, & Renfree, 2020; Filipas, Nerli Ballati, Bonato, La Torre, & Piacentini, 2018; Sandals et al., 2006; G. N. Sandford et al., 2018) incluyendo la mayoría de récords del mundo conseguidos hasta 1997 (Ross Tucker, Lambert, & Noakes, 2006) y juegos olímpicos (Sandford et al., 2018; Thiel et al., 2012). Sin embargo, se han encontrado otras estrategias cuando se han analizado las velocidades en cada parcial de 100 m, observándose que aunque se mantiene una mayor velocidad en la parte inicial de la prueba y un descenso posterior de esta, se ha encontrado una aceleración del 500 al 600 m que podría obedecer a cuestiones tácticas de conseguir una mejor posición para la recta final (Hanley, Stellingwerff, & Hettinga, 2019). Este descenso de velocidad final documentado no ocurre en mujeres de la misma especialidad donde la velocidad en los parciales finales de la prueba es más estable (Filipas et al., 2018), lo que podría estar justificado por la mayor duración de la prueba en mujeres. Esta estrategia en “positivo” difiere de las consideradas óptimas para pruebas de más larga duración donde si se aprecian incrementos de ritmo en la parte final de la prueba (Ross Tucker et al., 2006).

1.2.Requerimientos energéticos de la prueba

El análisis sobre los requerimientos energéticos de la prueba nos permite tener un conocimiento sobre el metabolismo que predomina, la fatiga y los factores determinantes del rendimiento en estas pruebas, lo cual es necesario para la programación del entrenamiento.

Por la duración de la prueba de 800 m y la intensidad a la que se disputa, por encima de $\text{VO}_2\text{máx}$, existe una clara contribución de los sistemas aeróbicos y anaeróbicos (Craig &

Morgan, 1998; Hill, 1999; Lacour, Barth, & Dormois, 1990; Thomas et al., 2005). Sin embargo, la importancia de uno u otro sistema ha sido objeto de estudio y discusión en numerosas ocasiones. El metabolismo anaeróbico podría tener una gran importancia en el rendimiento final de la prueba (Arcelli, Bianchi, Tebaldini, Bonato, & Torre, 2012; Brandon, 1995; Deason, Powers, Lawler, Ayers, & Stuart, 1991; Lacour, Barth, et al., 1990), encontrando una relación positiva significativa con el déficit de oxígeno acumulado ($r = 0,62$) (Nevill, Ramsbottom, Nevill, Newport, & Williams, 2008). Otro hallazgo que indica la importancia del metabolismo anaeróbico es el hecho de que los atletas de esta prueba llegan a alcanzar niveles de lactato por encima de los 15 mmol/l (Bosquet, Delhors, Duchene, Dupont, & Leger, 2007; Hanon & Thomas, 2011; Hill, 1999; Lacour, Bouvat, & Barthélémy, 1990), sólo por detrás de los valores encontrados en pruebas de 400 m (Gupta, Stanula, & Goswami, 2021) y siendo mayor en los deportistas de mayor nivel. La producción de lactato tiene lugar en mayor medida en la parte inicial de la prueba (0-300 m), alcanzado el pico de mayor concentración hacia mitad de prueba (300-600 m) y manteniéndose estable hasta el final de la misma (Arcelli et al., 2012). Estos valores de lactato sanguíneo están en relación con un aumento de la producción de lactato muscular (Bogdanis, Nevill, Boobis, & Lakomy, 1996) por una mayor utilización del metabolismo anaeróbico, el cual es predominante en los momentos iniciales de un esfuerzo de alta intensidad. Además, el porcentaje de consumo máximo de oxígeno en pruebas de media distancia es sensiblemente menor que en las de larga distancia, a pesar de que la intensidad de competición es mayor en el caso de las primeras (Brandon, 1995; Rabadán et al., 2011). Este hecho indica una mayor utilización del sistema anaeróbico en la producción energética de la prueba.

Sin embargo, la contribución del metabolismo aeróbico al gasto energético de la prueba de 800 m, contrariamente al pensamiento tradicional, es mayor que la del metabolismo anaeróbico siendo más determinante cuanto mayor es la duración de la prueba, pero ya a partir de los 30 segundos de duración del esfuerzo comienza a ser predominante respecto al metabolismo anaeróbico (Craig & Morgan, 1998; Hill, 1999; Spencer & Gastin, 2001; Spencer, Gastin, & Payne, 1996). Se ha encontrado una relación muy alta ($r = 0,92$) entre el consumo de oxígeno máximo y el rendimiento en la prueba de 800 m (Nevill et al., 2008). De hecho, el consumo de oxígeno máximo, junto con la economía de carrera, podría explicar el 95,9% del rendimiento en las pruebas de 800 m y 1500 m (Ingham et al., 2008). Se ha observado que la participación del metabolismo aeróbico es mayor en

deportistas de élite, aunque esto podría ser debido a los mayores valores de VO_2max que tienen los deportistas de este nivel (Olesen, Raabo, Bangsbo, & Secher, 1994). No obstante, en estudios muy recientes en los que se ha analizado la estrategia y el ritmo de competición en pruebas de 800 m de máximo nivel, se comienza a cuestionar la importancia del metabolismo aeróbico (Sandford et al., 2018b).

El porcentaje del consumo de oxígeno máximo que se alcanza en las pruebas de medio-fondo está en relación con la velocidad a la que se recorren los primeros metros de la prueba (Duffield, Bishop, & Dawson, 2006; Jones, Wilkerson, Vanhatalo, & Burnley, 2008). Algunos autores observaron que este porcentaje no llegaba a ser máximo cuando se simulaba la prueba en un tapiz rodante a una velocidad constante que pretendía agotar al deportista en aproximadamente 2 minutos (James, Sandals, Draper, Maldonado-Martin, & Wood, 2007; Spencer & Gastin, 2001; Spencer et al., 1996). En estos estudios, los sujetos alcanzaban un VO_2 pico del 90-95% del máximo. Sin embargo, estas condiciones están alejadas de la situación real en este tipo de pruebas, en las que se busca recorrer la distancia en el menor tiempo posible y en las que, por lo general, el ritmo no es constante sino con fluctuaciones importantes.

La evolución del consumo de oxígeno a lo largo de la prueba de 800 m realizada a la máxima velocidad posible y siguiendo la distribución real del ritmo que realizan los atletas de competición, presenta un modelo trifásico de distribución de consumo de oxígeno representado en las **figuras 1 y 2** (Christine Hanon, Claire Thomas, Jean-Michel Le Chevalier, Bruno Gajer, 2002; Thomas et al., 2005). En ella se observa un aumento inicial del VO_2 hasta el máximo (alcanzado en todos los sujetos participantes), una fase estable intermedia y un descenso en la parte final de la prueba, coincidente con una caída en la velocidad de carrera (Bruno Gajer, Christine Hanon, José Marajo, 2001; Hanon & Thomas, 2011; Jones et al., 2008; Sandals et al., 2006; Thomas et al., 2005). Este fenómeno coincide con los hallazgos realizados en las pruebas de 400 m y de 1500 m (Hanon, Lepretre, Bishop, & Thomas, 2010; Hanon, Levêque, Vivier, & Thomas, 2007; Hanon & Thomas, 2011; Thomas et al., 2005), así como en entrenamientos a intensidades próximas a la velocidad aeróbica máxima y con altos niveles de fatiga (Perrey, Candau, Millet, Borrani, & Rouillon, 2002).

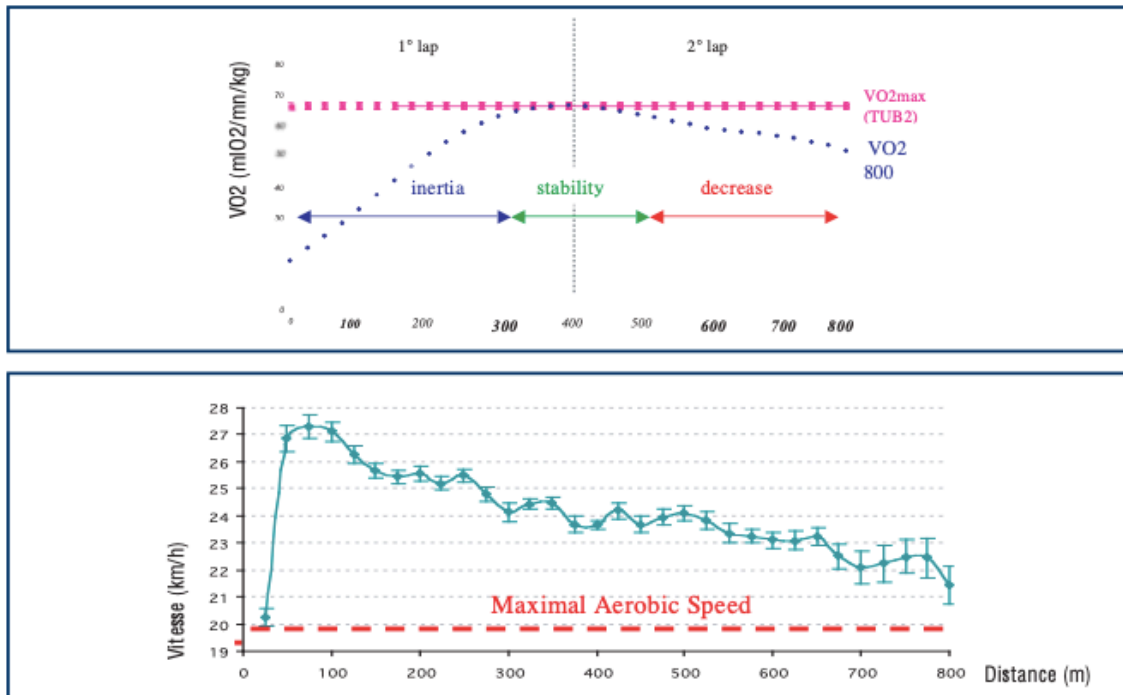


Figura 1: Evolución del consumo de oxígeno (arriba) y la velocidad (abajo) durante la prueba de 800 m (Christine Hanon, Claire Thomas, Jean-Michel Le Chevalier, Bruno Gajer, 2002)

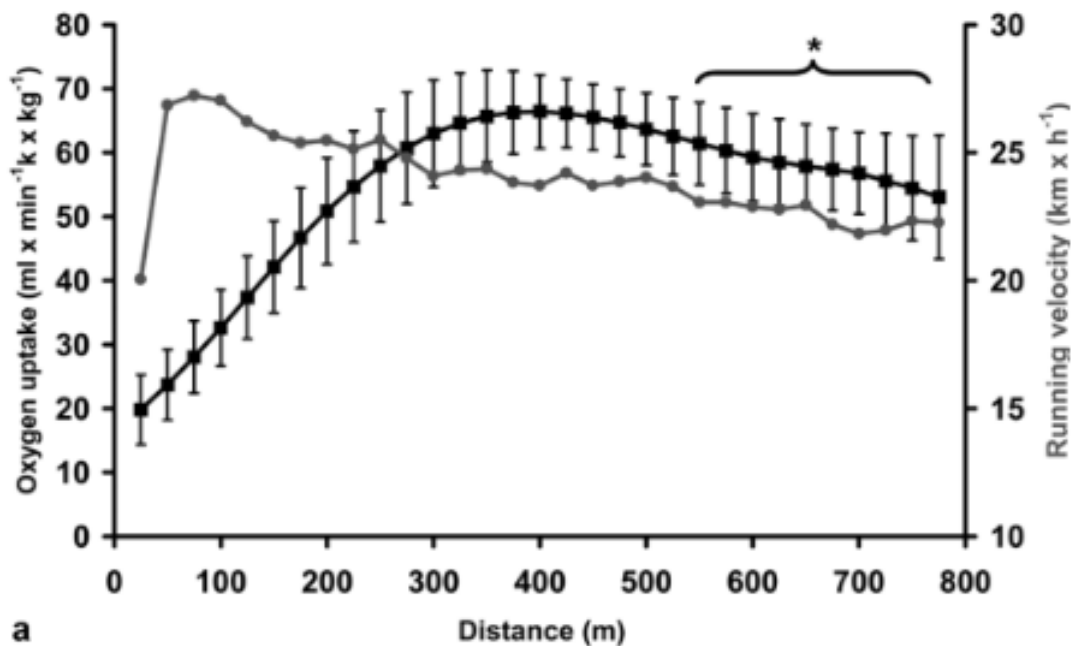


Figura 2: Evolución del consumo de oxígeno (línea negra con marcadores cuadrados) y la velocidad de carrera (línea gris con marcadores redondos) durante la prueba de 800 m en 5 corredores muy entrenados (Thomas et al., 2005).

El descenso del consumo de oxígeno al final de la prueba podría estar relacionado con la acidez, ya que se han encontrado altas correlaciones entre el pH de la sangre al finalizar la prueba y el descenso del consumo de oxígeno (Billat, Hamard, Koralsztein, & Morton,

2009; Hanon et al., 2010, 2007; Hanon & Thomas, 2011; Thomas et al., 2005). Por ello, la mejora de la capacidad de tamponar podría significar una menor reducción del consumo de oxígeno y de la velocidad de carrera al final de la prueba (Hanon et al., 2010; Hanon & Thomas, 2011).

La capacidad de difusión de lactato ha mostrado ser mayor en corredores de 800 m respecto a corredores de velocidad. Esto podría ser una adaptación producida por el tipo de entrenamiento realizado, con altos volúmenes a intensidades alrededor del $\text{VO}_{2\text{max}}$ y por una mayor presencia de fibras lentas (Bret et al., 2003). Sin embargo, la baja relación entre esta capacidad y la velocidad de carrera en 800 metros junto con los altos valores de consumo de oxígeno mencionados anteriormente sugieren que el rendimiento en la prueba está también determinado por otros factores.

Las diferencias en cuanto a la importancia de un metabolismo sobre el otro pueden deberse a la metodología empleada para su valoración, especialmente la contribución anaeróbica, por su dificultad para ser determinada, por un sesgo cultural hacia los estudios más orientados a la resistencia o por las posibles diferencias entre corredores con rendimientos parecidos, pero con contribuciones metabólicas distintas. Estas diferencias han puesto de manifiesto la necesidad de estudiar el perfil de los corredores de 800 m en cuanto a la vía energética predominante con vistas a adaptar el entrenamiento de la manera más específica posible. En este sentido, se han establecido tres tipos de perfil de corredor de 800 m atendiendo a sus características y al concepto de “*reserva de velocidad anaeróbica*”, que viene determinado por la diferencia entre la máxima velocidad de sprint y la velocidad aeróbica máxima (Sandford, Allen, Kilding, & Ross, 2018) y que ha mostrado tener una alta correlación con el rendimiento en corredores de élite con marcas parecidas al sujeto de este estudio (marca en 800 m: 1:44-1:45 min:ss). Estos autores también clasificaron a los corredores de 800 m en tres subgrupos atendiendo a su velocidad máxima de sprint y su “*ratio de reserva de velocidad*” que representa el cociente entre la velocidad máxima de sprint y la velocidad aeróbica máxima. Los subgrupos establecidos fueron: atletas de 400-800 m; atletas de 800 m y atletas de 800-1500 m, siendo los primeros los que mayores ratios de reserva de velocidad presentaban. Otra interesante aportación de estos autores es que cuando la velocidad máxima de sprint era la misma, tener una mayor velocidad aeróbica máxima no estaba altamente relacionado con mejoras en el tiempo de 800 m, lo cual pone de manifiesto la importancia

de desarrollar altos niveles de velocidad en este tipo de deportistas. Esto coincide con otros estudios realizados en deportistas de la misma especialidad y mismo nivel deportivo, donde se encontraron altas correlaciones entre la velocidad en 20 m y el rendimiento en 800 m (Bachero-Mena, Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, et al., 2017). Estas relaciones aumentaban cuando se comparaban con la velocidad alcanzada en 200 m.

La fuerza muscular no ha sido estudiada en profundidad en estos deportistas, aunque existen algunos estudios que han encontrado correlaciones entre la fuerza muscular de los miembros inferiores, la capacidad de salto y el sprint con el rendimiento en pruebas de corta duración (Loturco, D'Angelo, et al., 2015; Loturco, Pereira, et al., 2015; Markström & Olsson, 2013) pero también en pruebas de más larga duración como los 800 metros (Bachero-Mena, Pareja-Blanco, & González-Badillo, 2017; Bachero-Mena, Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, et al., 2017; Hudgins, Scharfenberg, Triplett, & McBride, 2013) parece existir una correlación positiva entre los valores de fuerza y el tiempo en la prueba.

En cuanto a la evolución de la frecuencia cardíaca, se encontró una respuesta inicial parecida a la acontecida con el consumo de oxígeno, con un incremento progresivo en la primera parte de la prueba, pero manteniéndose en valores máximos hasta el final de la prueba (**Figura 3**).

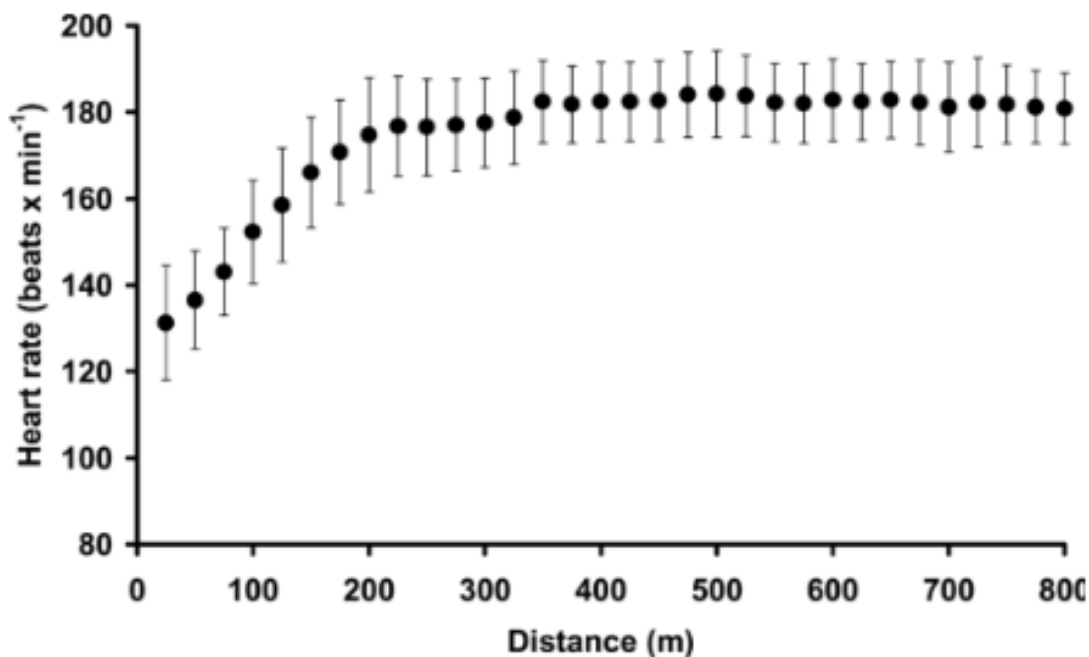


Figura 3: Evolución de los valores medios de FC durante una prueba de 800 metros (Thomas et al., 2005)

En síntesis, por la información que se tiene hoy en día de las pruebas de medio-fondo, el entrenamiento debe ser un equilibrio entre el esfuerzo interválico aeróbico y anaeróbico (Billat et al., 2009; Hill, 1999; Parmar, Jones, & Hayes, 2021).

1.3.Diferencias en el rendimiento entre pruebas de laboratorio y campo

La utilización de test de laboratorio está ampliamente extendida en el deporte de competición. La posibilidad de medir de manera directa parámetros fisiológicos en condiciones controladas (viento, temperatura o humedad), permite que los investigadores y entrenadores puedan analizar de manera más precisa los cambios en algunas variables relacionadas con el rendimiento deportivo (Miller et al., 2019). En el caso concreto de la carrera a pie, el estudio de variables como el VO_2max , los umbrales ventilatorios o de lactato ha sido utilizado en la valoración de estos deportistas desde hace bastante tiempo (Kenney & Hodgson, 1985; Londeree, 1986), especialmente en corredores de media y larga distancia. Una de las variables más utilizadas en la valoración de corredores, incluidos aquellos esfuerzos de duración aproximada a la prueba de 800 m, es la velocidad aeróbica máxima (VAM) (Billat et al., 2009), entendida como la mínima velocidad a la que se alcanza el consumo máximo de oxígeno. La VAM permite obtener una

información integrada del consumo de oxígeno y la economía de carrera (Billat & Koralsztein, 1996; McLaughlin, Howley, Bassett, Thompson, & Fitzhugh, 2010). La velocidad pico alcanzada en un test incremental en tapiz también ha mostrado ser útil en la valoración de corredores (Noakes, Myburgh, & Schall, 1990) por su relación con el rendimiento en pruebas de resistencia.

Sin embargo, el coste y la dificultad de acceso a pruebas de laboratorio sigue siendo para muchos entrenadores una barrera en la valoración de sus deportistas. Por ese motivo, se han desarrollado pruebas de campo que por su especificidad permiten estimar variables fisiológicas y analizar indicadores de rendimiento en condiciones reales. (Cooper, 1968; Léger & Boucher, 1980).

Sin embargo, a la hora de extrapolar o aplicar los valores obtenidos en pruebas de laboratorio a las condiciones reales en campo, no parece que exista todavía una evidencia clara de su validez en todos los casos (Miller et al., 2019). Algunos autores han encontrado diferencias en los valores de consumo de oxígeno obtenidos ante pruebas incrementales realizadas en ambas superficies, siendo mayor cuando se realizaban en una pista (Pugh, 1970). Estos mismos autores indican que esta diferencia en el consumo de oxígeno puede estar explicada principalmente por el coste energético que supone superar la resistencia del aire cuando el test se realiza con desplazamiento del sujeto. De hecho, está ampliamente aceptado en los protocolos de valoración que utilizar un 1% de pendiente en el tapiz podría compensar el coste energético extra que se produce cuando la prueba se realiza con desplazamiento (Heck et al., 1985; Jones & Doust, 1996).

En estudios más recientes se ha observado que no existen diferencias significativas en las variables fisiológicas medidas entre un test en tapiz y un test en pista, habiéndose encontrado valores de consumo máximo de oxígeno, frecuencia cardíaca y lactato parecidos en ambas condiciones (McMiken & Daniels, 1976; Meyer, Welter, Scharhag, & Kindermann, 2003; Miller et al., 2019; Mooses, Tippi, Mooses, Durussel, & Mäestu, 2015). Al analizar el rendimiento en este tipo de pruebas, en algunos estudios se han encontrado menores velocidades alcanzadas en el tapiz respecto a la pista (Meyer et al., 2003; Peserico & Machado, 2014), a pesar de la ausencia de diferencias en las variables fisiológicas mencionadas anteriormente, y eso se interpretó como una menor economía de carrera (Mooses et al., 2015). Los motivos podrían estar relacionados con factores motivacionales, movimientos de carrera menos económicos en el tapiz y una

termorregulación menos eficiente. Encontramos resultados parecidos al analizar las diferencias entre ambas superficies en esfuerzos de muy alta intensidad (sprints) y que indican mayores velocidades alcanzadas en la pista respecto al tapiz (Morin & Sève, 2011; Nummela, Hämäläinen, & Rusko, 2007). Sin embargo, encontramos estudios con resultados opuestos a los anteriores y que indican que la velocidad alcanzada en el tapiz es significativamente mayor que la alcanzada en una superficie en esfuerzos de media y larga duración (Cappa, García, Secchi, & Maddigan, 2014) y en sprints a máxima velocidad (Bowtell, Tan, & Wilson, 2009). En una reciente revisión (Miller et al., 2019), los autores indican que actualmente no parece estar resuelto si los resultados de las valoraciones de rendimiento en laboratorio, usando un tapiz rodante, pueden ser aplicados al entrenamiento de los deportistas en las condiciones reales.

1.4.Cuantificación del entrenamiento

La carga de entrenamiento en cualquier deporte de competición viene descrita por la combinación de tres variables: volumen, intensidad y frecuencia (Bompa & Haff, 2009; Smith, 2003; Wenger & Bell, 1986), aunque también habría que añadir el tipo de ejercicio utilizado (González-Badillo & Ribas-Serna, 2002).

Cuantificar la carga es un proceso habitual dentro del seguimiento de los deportistas de competición (Coutts, Crowcroft, & Kempton, 2017). La cuantificación de la carga de entrenamiento ha evolucionado mucho en el último siglo y esta evolución surge de la necesidad de buscar y encontrar explicación a los diferentes rendimientos alcanzados por los deportistas (González-Badillo & Ribas-Serna, 2002). Para ello, es necesario un análisis de la carga objetiva realizada por el deportista (carga externa o propuesta) y el estrés biológico producido en el deportista (carga interna o real) (Bourdon et al., 2017; Foster, Rodríguez-Marroyo, & de Koning, 2017; Impellizzeri, Marcora, & Coutts, 2019; Mujika, 2017). Este proceso es indispensable de cara a determinar si los deportistas se están adaptando al entrenamiento y proponer los cambios o modificaciones en sus programas en caso de ser necesario (Bourdon et al., 2017; Coutts et al., 2017; Impellizzeri et al., 2019; Iñigo Mujika, 2017; Smith, 2003), así como evitar el aumento del riesgo de lesiones o enfermedades (Coyne, Gregory Haff, Coutts, Newton, & Nimphius, 2018; Meeusen et al., 2013). Aunque el entrenamiento de pruebas de modalidades olímpicas ha sido ampliamente descrito en la bibliografía existente, observamos que en pocos casos se

ha cuantificado la carga de entrenamiento de los deportistas de alto nivel competitivo, las adaptaciones fisiológicas y su efecto en el rendimiento (Borresen & Ian Lambert, 2009). Por este motivo, es razonable sugerir que los entrenadores e investigadores deberían profundizar en el estudio de la carga con el objetivo de definirla de manera precisa, controlar la relación entre la carga real y la carga propuesta y entre ambas y el rendimiento, y validar modelos de medición y cuantificación (González-Badillo & Ribas-Serna, 2002).

Actualmente existen muchos sistemas de cuantificación de la carga en función de la variable utilizada y la capacidad entrenada (Borresen & Ian Lambert, 2009). Estos sistemas pueden clasificarse como externos e internos. Los primeros están referidos al entrenamiento realizado por el deportista, y los internos hacen referencia a la respuesta del organismo ante la carga externa (Bourdon et al., 2017; Wallace, Slattery, & Coutts, 2014).

En cuanto al ejercicio de resistencia, existen distintos métodos de cuantificación que principalmente se han basado en zonas de intensidad en función de hitos fisiológicos (umbrales de lactato, umbrales ventilatorios, porcentajes del consumo máximo de oxígeno o de la frecuencia cardíaca máxima) o de factores subjetivos (Kenneally, Casado, & Santos-Concejero, 2018).

Uno de los métodos de cuantificación del entrenamiento más conocido hace referencia al tiempo o distancia total de trabajo en las diferentes zonas de intensidad delimitadas por el umbral aeróbico y anaeróbico (Tjelta, 2013; Seiler & Kjerland, 2006).

El método de sesión RPE (rate of perceived exertion) es un modelo de cuantificación de la carga subjetivo que se basa en la percepción de esfuerzo del sujeto (Foster et al., 2001) y que busca dar respuesta a la cuantificación de la carga de alta intensidad realizada de manera intermitente. Completando un cuestionario post entrenamiento, en el que el esfuerzo se clasifica en una escala del 0 al 10 (**Figura 4**), se puede estimar de manera subjetiva el grado de esfuerzo que ha significado el entrenamiento para el sujeto. El valor de carga se calcula multiplicando el valor del RPE por la duración del esfuerzo o por el número de repeticiones en el entrenamiento de fuerza (Festa, Tarperi, Skroce, La Torre, & Schena, 2020; Ian Lambert & Borresen, 2010). Este modelo ha mostrado una alta correlación con el método de sumas de tiempos a zonas de frecuencia cardíaca (Foster et

al., 2001). Su facilidad de uso ha hecho que sea muy utilizado en los deportes cíclicos de resistencia, ya que cualquier sujeto puede completar el cuestionario con pocas instrucciones y por su mejor utilidad ante ejercicios de muy alta intensidad (incluido trabajo de fuerza) respecto al método de sumas de tiempos a zonas de frecuencia cardiaca. Sin embargo, la validez y sensibilidad de este método tiene que ser todavía confirmada (Borresen & Lambert, 2008; Chen, Fan, & Moe, 2002; Wallace et al., 2014), pudiendo ser mejoradas con la utilización del RPE con escala 6-20 y con la familiarización del cuestionario. Tanto la frecuencia cardiaca como el índice de esfuerzo percibido (RPE) y el lactato en sangre han mostrado buena fiabilidad (Seiler & Kjerland, 2006).

Scores	Descriptor
0	Rest
1	Very, Very Easy
2	Easy
3	Moderate
4	Somewhat Hard
5	Hard
6	-
7	Very Hard
8	-
9	-
10	Maximum

Figura 4: Escala de percepción de esfuerzo de 0 a 10 que se completa 30 minutos después de finalizar el esfuerzo (C Foster et al., 2001)

El método de TRIMPS desarrollado por Banister et al., (1975) es un método en el que se tienen en cuenta la respuesta de la FC durante el ejercicio y la duración de este. Sin embargo, este modelo presenta ciertas limitaciones, ya que requiere una frecuencia cardiaca estable, por lo que quedarían excluidos esfuerzos repetidos de alta intensidad que podrían verse subestimados (Borresen & Lambert, 2008; Renfree, Casado, &

McLaren, 2021). Una adaptación del original método de TRIMPs, está basado en 3 zonas principales de intensidad a cada cual se le asigna un coeficiente corrector (1, 2 y 3) que se multiplica por el número de minutos realizados en cada zona de FC (Carl Foster et al., 2001; Lucía, Hoyos, Santalla, Earnest, & Chicharro, 2003). Este método de cuantificación de la carga, ha mostrado ser útil en corredores de larga distancia (Manzi, Iellamo, Impellizzeri, D'Ottavio, & Castagna, 2009). Sin embargo, y pese a que la frecuencia cardíaca presenta una gran fiabilidad en la medida de la intensidad del ejercicio, los TRIMPS presentaron una pobre fiabilidad, lo cual parece indicar que podría haber un potencial error en el coeficiente corrector (Wallace et al., 2014).

Recientemente, se ha desarrollado un método de cuantificación de la carga que permite comparar modalidades deportivas distintas, siempre que sean deportes de resistencia como el de nuestro estudio. La “escala de carga objetiva” (ECO) se basa en la clasificación de los esfuerzos en distintas zonas de intensidad atendiendo de nuevo a parámetros fisiológicos. A cada una de estas zonas se les aplica un coeficiente que al multiplicarlo por el volumen (tiempo) realizado en cada zona, proporciona el valor de carga del deportista (Cejuela-Anta & Esteve-Lanao, 2011).

El hecho de haberse desarrollado numerosos modelos para la cuantificación de la carga sugiere que; 1) la cuantificación de la misma es una necesidad si queremos encontrar una explicación al rendimiento obtenido por los deportistas, y 2) no existe una única herramienta o método válido para todas las especialidades (Bourdon et al., 2017). El modelo de cuantificación del entrenamiento debe adaptarse a las necesidades del deporte y del deportista (Borresen & Lambert, 2009). Sin embargo, no parece que el modo de hacerlo este suficientemente definido (Foster et al., 2001), especialmente en deportes cuyos esfuerzos se realizan mediante métodos interválicos de alta intensidad (Renfree et al., 2021).

1.5. Control de la carga mediante el salto vertical

La utilización del salto con contramovimiento, o CMJ por sus siglas en inglés “countermovement jump”, como indicador de la fatiga producida ha sido descrita en el entrenamiento de fuerza (Pareja-Blanco et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011a; Watkins et al., 2017). Al estudiar la pérdida de velocidad respecto al número de repeticiones en ejercicio de sentadilla, el CMJ mostró una alta correlación

positiva con la concentración de lactato en sangre (0'97) y con la pérdida media de velocidad propulsiva en la serie (0'93), lo que sugiere que el CMJ es un buen indicador de la fatiga producida por la carga de entrenamiento (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011a). Aunque esta correlación fue medida en entrenamiento de fuerza (sentadilla profunda), se observó que la relación se mantiene cuando se utilizan otros ejercicios. Se han encontrado resultados parecidos cuando se evaluaron distintos tipos de entrenamiento específicos en corredores de 400 m (Gorostiaga et al., 2010). La fatiga medida a través de la pérdida de salto vertical pre y post ejercicio mostró una relación significativa con los niveles de lactato y amonio en sangre. La relación mostró ser curvilínea, lo que revela que sobrepasar cierto umbral de lactato (8-12 mmol/l) y de amonio (50-100 μ mol/l) puede provocar una fatiga excesiva y una recuperación del esfuerzo tardía. En otros estudios realizados con corredores de velocidad, en los que se realizaron repeticiones de 40 m y 60 m hasta perder un 3% de velocidad, se encontró una correlación muy alta entre la pérdida de salto vertical y el lactato ($r=0,93-0,99$), el amonio ($r=0,94-0,99$) y la pérdida de velocidad en la serie ($r=0,76$) (Jimenez-Reyes et al., 2016; Pedro Jiménez-Reyes et al., 2019). Estos resultados coinciden con los hallados en corredores de 800 m de alto nivel al realizar un entrenamiento “típico” de su prueba (Bachero-Mena & González-Badillo, 2021). Al medir el CMJ y el lactato después de cada uno de los esfuerzos de la sesión, estos autores encontraron una relación negativa significativa ($r = -0,83$) entre los valores de salto y la concentración de lactato. De los resultados de los estudios mencionados se puede deducir que la medición del CMJ en entrenamientos de alta intensidad puede ofrecer una información útil para el control de la carga de entrenamiento.

En línea de los anteriores estudios, se ha estudiado la relación entre la carga de entrenamiento y la evolución del rendimiento a través del CMJ a lo largo de dos temporadas de aire libre y una de pista cubierta en velocistas y saltadores (Jiménez-Reyes & González-Badillo, 2011). El CMJ mostró ser un buen predictor del rendimiento en la semana de competición. Los resultados en CMJ eran máximo o próximos al máximo de todo el periodo analizado en el mes previo a la competición con el mejor resultado, mientras que ocurría lo contrario cuando el resultado en competición era el peor de todo el periodo analizado. Además, la capacidad de salto mostró una alta dependencia de la carga de entrenamiento.

La utilización del CMJ en corredores de más larga duración no ha sido estudiada tan en profundidad en la bibliografía como en deportistas de fuerza y velocidad. Sin embargo, al estudiar la evolución del CMJ semanal durante una temporada atlética en corredores de media distancia, se encontraron resultados parecidos a los anteriores. Los corredores que tenían niveles de cortisol en saliva más elevados tenían menores valores de salto. Además, se encontró una relación negativa significativa entre la carga de entrenamiento y los valores de CMJ a lo largo de la temporada (Balsalobre-Fernández, Tejero-González, & Del Campo-Vecino, 2014). Estos autores también encontraron que el valor de salto en la semana donde el deportista obtenía el mejor resultado en competición era mayor que la media de la sesión. Cuando el resultado era el peor, el valor de salto se mantenía en los niveles medios. Estos resultados indican que la utilización del salto podría ser útil para el control de la condición física y la valoración de la carga de entrenamiento. Por tanto, los cambios en el salto vertical podrían estar asociados a los cambios en el rendimiento físico y deportivo.

El CMJ ha mostrado ser una buena herramienta para detectar la fatiga neuromuscular. De hecho, se ha analizado la idoneidad de diferentes tests de salto (SJ, CMJ, DJ) y de Sprint de carrera (20 m sprint) para detectar la fatiga directamente tras el esfuerzo y tras 24 y 72 horas. Los tests que están determinados por el ciclo estiramiento-acortamiento en su ejecución (CMJ, DJ) mostraron más sensibilidad a la fatiga transcurridas 24 y 72 horas tras el esfuerzo, dado que fueron los que experimentaron menor recuperación en sus valores. Además, el CMJ tuvo mayor fiabilidad en la medida que el resto de los tests (Gathercole et al., 2015). Además, parece que el CMJ medio podría ser más sensible que el mejor CMJ a la hora de controlar los cambios en el rendimiento (Claudino et al., 2017). Resultados parecidos se encontraron al utilizar el CMJ como indicador de fatiga a las 24-48h de un entrenamiento de fuerza en sentadilla (Pareja-Blanco et al., 2016; Watkins et al., 2017). Por estas razones, los autores consideraron que el test de CMJ era el más idóneo de los utilizados en su estudio para detectar la fatiga de los deportistas después de esfuerzos de carrera. Resultados similares se obtuvieron al comparar el tiempo de recuperación después de realizar tres series de doce o de ocho repeticiones hasta el fallo muscular en comparación con hacer la mitad de las repeticiones, observándose que a las 48 horas no se había recuperado la capacidad de salto después de los entrenamientos hasta el fallo, mientras que cuando se hacían la mitad de las repeticiones no sólo había recuperación, sino una tendencia al aumento del salto vertical (González-Badillo et al.,

2016; Pareja-Blanco et al., 2016; Pareja-Blanco, Villalba-Fernández, Cornejo-Daza, Sánchez-Valdepeñas, & González-Badillo, 2019).

No hemos encontrado, sin embargo, estudios que analicen de manera precisa cuál es la relación entre la carga de entrenamiento, cuantificada a través del producto de la intensidad y el tiempo de esfuerzo, y algunos indicadores de rendimiento como el salto, la velocidad aeróbica máxima, el tiempo límite a la intensidad de la velocidad aeróbica máxima e indicadores de potencia anaeróbica como la prueba de 20 m y 300 m en corredores de medio-fondo de alto nivel, así como el efecto que produce cada uno de los valores de carga que se utilizan en el rendimiento, la fatiga y la recuperación medida a través de dichas pruebas de rendimiento. Por todo ello, los problemas objeto de estudio son los siguientes:

2. PROBLEMA

¿Cuál es la relación entre la carga de entrenamiento utilizada en un corredor de medio-fondo de alto nivel y los indicadores de fuerza, velocidad y potencia aeróbica y anaeróbica a lo largo de cuatro temporadas?

3. OBJETIVO

Ante esta problemática, el objetivo principal del estudio es analizar la relación entre la carga de entrenamiento y la evolución de los indicadores de fuerza, velocidad y potencia aeróbica y anaeróbica en un corredor de medio-fondo de alto nivel.

Como objetivos complementarios del primero, nos proponemos:

- Conocer el grado de validez de un índice de carga determinado por el producto de la intensidad y el volumen de cada sesión de entrenamiento.
- Comprobar las diferencias en el rendimiento físico obtenido en un test incremental de velocidad aeróbica máxima en función de la superficie donde se realiza la valoración en corredores de medio-fondo de alto nivel.

4. HIPÓTESIS

No disponemos de información de estudios longitudinales que hayan analizado la evolución de variables a lo largo del tiempo en deportistas de cualquier nivel. Por tanto, no tenemos elementos para deducir una posible hipótesis aplicable directamente a las características de nuestro estudio. No obstante, existen algunos estudios en los que se ha analizado el efecto de distintos tipos de esfuerzo de sesiones aisladas sobre el cambio en la capacidad de salto (González-Badillo et al., 2016; Gorostiaga et al., 2010; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011b). En otros estudios, se observaron una alta relación ($r > 0,9$) entre la pérdida de velocidad en cada carrera de 40 m y 60 m (fatiga) y la pérdida de CMJ durante la serie de carreras realizadas hasta perder un 3% de la velocidad máxima (Jimenez-Reyes et al., 2016; Jiménez-Reyes et al., 2019).

Por otro lado, se han encontrado que los test de 300 m y de 100 m podían explicar gran parte de la varianza del rendimiento en la prueba de 800 m (Deason et al., 1991), mientras que otros autores concluyen que la velocidad del consumo máximo de oxígeno y el tiempo límite a esta velocidad, pueden aportar una gran información a la hora de valorar el rendimiento de corredores de 1500 metros en adelante (Billat & Koralsztein, 1996).

Según estos antecedentes, es probable que exista una relación entre la carga de entrenamiento de las sesiones realizadas por un corredor de medio-fondo y la pérdida de salto post esfuerzo en el conjunto de las sesiones realizadas a lo largo de la temporada. Por tanto, nuestra hipótesis es la siguiente: *la evolución de la carga de entrenamiento, cuantificada por el producto del volumen y la intensidad de cada sesión de entrenamiento, presenta una relación significativa con los indicadores de fuerza, velocidad y potencia aeróbica y anaeróbica.*

Metodología

5. METODOLOGÍA

5.1. Estudio Preliminar

Previo al inicio del estudio principal que compone la presente tesis doctoral, y puesto que durante el presente trabajo el rendimiento del deportista tuvo que ser valorado en pruebas de “laboratorio” que implican la utilización de un tapiz rodante que aseguraran mantener las condiciones ambientales estables durante todos los periodos del año, se realizó un estudio preliminar con el objetivo de contrastar las diferencias que pueden existir entre el rendimiento alcanzado en tapiz rodante y en pista. Los resultados de este estudio nos permitieron extrapolar los ritmos obtenidos en esta superficie a la pista donde habitualmente se desempeña el deportista.

Tipo de investigación

La metodología del estudio viene determinada por el tipo de investigación y, en concreto, por los objetivos detallados anteriormente y el control que se tienen sobre las variables. Dadas las características del estudio preliminar, se trata de una investigación de tipo **cuantitativa**. Por el grado de manipulación de las variables y los objetivos del estudio, la investigación es de tipo **descriptiva inferencial** y **correlacional**. Por último, la investigación es de tipo **transversal**, ya que el análisis de los cambios se llevó a cabo en un mismo periodo de tiempo (48-72 horas).

Muestra

La muestra para este estudio previo estuvo compuesta por 10 corredores hombres de medio-fondo de nivel nacional e internacional (marcas en 800m en un rango de 1:44-1:58). En la muestra estaba incluido el sujeto objeto de estudio en esa tesis doctoral cuyas características serán descritas en el apartado correspondiente del “Estudio Principal” y otro sujeto cuyas marcas se encuentran por debajo de las marcas mínimas de asistencia a Juegos Olímpicos y campeonatos del mundo. Además, se incluyó en el estudio un grupo de 10 corredoras del mismo nivel deportivo y de la misma especialidad para comprobar posibles diferencias entre sexos o entre distintas intensidades absolutas. Las características físicas de los sujetos se presentan en la **tabla 5.1**. Lo sujetos debieron dar su consentimiento informado por escrito (**Anexo 1**)

Tabla 5.1: Características de los sujetos (medias \pm dt) (n=10)

Edad (años)	Altura (cm)	Peso (kg)
28,9 \pm 8,5	176,9 \pm 5,6	66,1 \pm 6,7

Diseño del estudio

El estudio preliminar fue diseñado para estudiar y analizar las diferencias en el rendimiento en una prueba de carrera incremental de tipo máximo realizada en dos superficies distintas (tapiz rodante y pista de atletismo) en corredores de nivel nacional e internacional con amplia experiencia en este tipo de pruebas y en ambos tipos de superficies. Además, se realizó un test de fuerza con el objetivo de analizar si las posibles diferencias encontradas podrían estar explicadas por el nivel de fuerza de los deportistas. Los tests de valoración de carrera se llevaron a cabo durante dos sesiones en días distintos separados por un mínimo de 48 h y un máximo de 72 h. La valoración de fuerza se realizó en una sesión diferente dentro de la misma semana. Para controlar la posible influencia del orden de realización de los test sobre los resultados, se asignó aleatoriamente a cada sujeto a un grupo en función del orden de los test: a) tapiz-pista y b) pista-tapiz. Los sujetos fueron advertidos de no realizar ejercicio físico intenso las 48 horas previas al primer test ni en las 48-72 h entre ambos.

Variables objeto de estudio

- Variable independiente

Como variable independiente para esta investigación preliminar, se utilizó la superficie donde el deportista realiza la carrera, la pendiente a la que corría y la resistencia a la penetración en el aire.

- Variables dependientes

Las principales variables que se analizaron fueron las indicadas a continuación:

- Velocidad (km/h) y tiempo (min) final alcanzado: Valor de velocidad y tiempo final del deportista antes de detenerse.
- Lactatemia (mmol/l): Concentración sanguínea de lactato posterior al esfuerzo.

- Pérdida de salto vertical con contramovimiento (CMJ) (%): Porcentaje que representa la media de las pérdidas después de cada test con respecto al valor de altura de salto previo al inicio del mismo.
- Frecuencia cardíaca máxima y media (l/min): Valor de frecuencia cardíaca máxima alcanzada durante cualquier momento del test y en el primer minuto de la recuperación. El valor de frecuencia cardíaca media corresponde a la media del tiempo de esfuerzo.
- Control de variables contaminantes

Las posibles variables contaminantes que han podido afectar a los resultados del presente estudio hacen referencia a:

- Validez de los instrumentos: Cada uno de los instrumentos utilizados miden directamente la variable para la que fueron utilizados, por lo que se garantiza su validez respecto a las mismas, es decir, se asegura que miden lo que se pretende medir. Además, se contrastó su precisión antes de cada utilización calibrándolos o comprobándolos con instrumentos previamente validados. Algunas variables fueron resultado de cálculos de las variables directamente medidas.
- Ejecución técnica y cumplimiento de los protocolos de evaluación: Este aspecto se controla debidamente en el momento de realización de los tests y en cada una de las sesiones programadas. Dado que los deportistas tenían amplia experiencia en la realización de las diferentes pruebas realizadas durante el estudio, es razonable aceptar que el efecto de aprendizaje no ha existido. Además, las sesiones evaluación que formaron parte de este estudio se llevaron a cabo bajo la atenta supervisión del equipo de investigadores.
- Condiciones ambientales: Las variables situacionales se minimizaron dentro de las condiciones propias del estudio, donde se comparan dos pruebas realizadas en laboratorio y en campo. El estudio se llevó a cabo en un momento del año donde las temperaturas en el exterior eran parecidas a las que se tenían en el laboratorio. Además, se controló la velocidad del viento en la prueba de campo considerándose apta si se encontraban dentro de los límites reglamentarios de la federación internacional de atletismo ($2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Los deportistas realizaron las pruebas en la

misma hora del día, manteniendo mismo las pautas de alimentación, hidratación y descanso.

Evaluaciones y pruebas físicas

- Antropometría

Con el objeto de describir la muestra se realizó una evaluación antropométrica de los sujetos en la primera sesión de valoración realizada. Para llevarla a cabo, los sujetos debían estar descalzos y con la menor ropa posible (únicamente en pantalón corto).

- Masa corporal (kg): Cada deportista fue pesado colocándole en posición erecta, en el centro de una báscula de precisión (Seca 710, Seca Ltd., Hamburgo, Alemania).
 - Talla (m): Se midió como la distancia entre el vértex y las plantas de los pies. El deportista se encontraba descalzo, en bipedestación, con los talones, glúteos, espalda y región occipital en contacto con el plano vertical del tallímetro (Seca 710, Seca Ltd., Hamburgo, Alemania).
- Test de velocidad aeróbica máxima (VAM)

El test de VAM es un test de carrera incremental en rampa que pretende estimar la mínima velocidad a la que se alcanza el consumo de oxígeno máximo (VO_{2max}). Los deportistas llevaron a cabo dos tests de velocidad aeróbica máxima, uno en tapiz y otro en pista tal como se ha indicado en el apartado “Diseño”.

El tapiz utilizado (Valiant 2 Sport, LODE, Groningen, Netherland) permite desplazarse a una velocidad entre 1 y 25 $km \cdot h^{-1}$, con incrementos en velocidad de 0,1 $km \cdot h^{-1}$ y con una pendiente de hasta el 25% (**Figura 5.1**). Para comprobar la precisión del dispositivo, se realizó una comprobación de todas las velocidades mediante la utilización de un tacómetro. En todos los test la carrera comenzaba a una velocidad inicial de 8 $km \cdot h^{-1}$ y se aumentaba la velocidad con incrementos progresivos en rampa de 0,5 $km \cdot h^{-1}$ cada minuto. En el tapiz se incluyó una pendiente del 1% conforme dictan los protocolo de valoración (Jones & Doust, 1996). En este dispositivo, la velocidad se modificaba automáticamente por el protocolo instalado por el fabricante. Para realizar el test en la

pista, se marcó con conos la pista de atletismo cada 25 m y se utilizó un sistema de audio para marcar el ritmo que debía seguir el atleta. En ambos casos, los deportistas debían adaptar su carrera al ritmo marcado y correr hasta el momento de no poder mantener la velocidad establecida. Se registró tiempo y velocidad final alcanzada por cada deportista en cada uno de los dos tests.



Figura 5.1: Tapiz rodante (Valiant 2 Sport, LODE, Groningen, Netherland)

- Salto vertical con contra movimiento (CMJ)

El “*counter movement jump*” o CMJ es un salto vertical en el que se busca alcanzar la máxima elevación del centro de gravedad realizando una flexión-extensión rápida de piernas con la mínima parada entre ambas fases. La cualidad principal que se pretende estimar es la capacidad de producir fuerza en unidad de tiempo en la musculatura implicada en la extensión de las piernas. El sujeto comienza de pie, con las manos en las caderas para evitar la ayuda de los brazos, para a continuación realizar una flexión de piernas seguida de una extensión de estas con la mayor velocidad posible. El grado de flexión en el movimiento fue elegido libremente por el deportista, aunque se controló que estuviera aproximadamente en 90°. Durante la fase de vuelo, el deportista debía mantener el cuerpo erecto y piernas y pies extendidos. El contacto con el suelo debía realizarse de metatarso y sólo posteriormente, el sujeto podía flexionar las piernas para amortiguar el impacto de la caída (**Figura 5.2**).

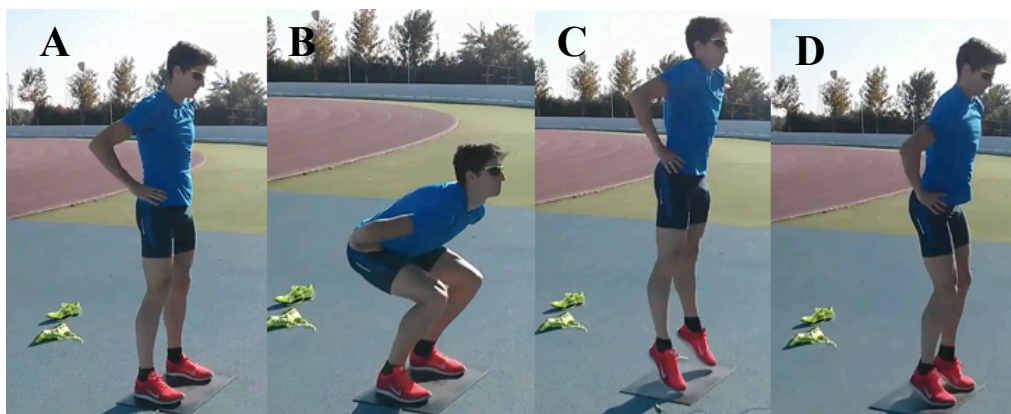


Figura 5.2: Representación gráfica de la ejecución del salto vertical con contramovimiento mostrando las principales fases del movimiento. A: posición inicial; B: máxima flexión de piernas; C: despegue; D: aterrizaje.

La medición de la altura del salto vertical se obtuvo a través de la medición del tiempo de vuelo mediante una plataforma de contacto DIN-A2 (Ergojump-Boscosystem contact platform, Barcelona, España) validada para tal uso (De Blas, Padullés, Del Amo, & Guerra-Balic, 2012) (**Figura 5.3**). Los sujetos tenían experiencia en la ejecución del CMJ por lo que no fue necesario realizar una familiarización previa al inicio del estudio.



Figura 5.3: Plataforma de contacto (Ergojump-Boscosystem, Barcelona, España)

- Medición de la concentración sanguínea de lactato (mmol/l)

Para la medición de la concentración sanguínea de lactato se obtuvo una muestra de sangre capilar del lóbulo de la oreja antes y después de cada una de las pruebas incrementales mediante un analizador portátil de lactato Lactate Pro 2 (Arkay, Kyoto, Japan) (**Figura 5.4**). Este dispositivo, de calibrado automático, permite medir en un rango de $0.5 - 25 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ de sangre y ha mostrado una alta fiabilidad (Bonaventura et al., 2015). La medición se realizó a los 3 minutos de la finalización de dichas pruebas.



Figura 5.4: Analizador de lactato portátil Lactate Pro 2 (Arkray, Japan)

- Medición de la frecuencia cardíaca (l/min)

Para la medición de la frecuencia cardíaca los deportistas portaban un pulsímetro (Polar V800, Polar Electro OY) alrededor del pecho como el fabricante recomienda para su uso (**Figura 5.5**). El registro de la frecuencia cardíaca se hacía durante todo el tiempo de esfuerzo y recuperación.



Figura 5.5: Pulsímetro portátil (Polar V800, Polar Electro OY)

Análisis estadístico

Para la descripción de los resultados se utilizaron cálculos estandarizados de la media y la desviación típica (DT). Para comprobar las diferencias entre los datos de las variables en cada test se aplicó la T de Student. Los análisis fueron realizados usando el paquete estadístico SPSS versión 25 (SPSS INC., Chicago, IL). El nivel de significación estadístico se estableció para una probabilidad de error máxima igual o inferior al 5% ($p \leq 0,05$).

5.2. Estudio principal

Tipo de investigación

La metodología del estudio viene determinada por el tipo de investigación y, en concreto, por los objetivos planteados anteriormente y el control que se tienen sobre las variables. Dadas las características del estudio, se trata de una investigación de tipo **cuantitativo**. Por el grado de manipulación de las variables y los objetivos del estudio, la investigación es de tipo **descriptiva** mediante un estudio de tipo “**ex post facto**”, con un único sujeto (estudio de un caso). Por el enfoque del análisis de los datos, la investigación es parte **inferencial** y parte **correlacional**, con la variable “carga de entrenamiento” como independiente. Por último, la investigación es de tipo **longitudinal**, ya que el análisis de los cambios en el rendimiento del deportista se llevó a cabo durante un período de tiempo que comprendió cuatro temporadas atléticas completas divididas en dos ciclos distintos cada una de ellas (pista cubierta y aire libre) para completar entre 40 y 45 semanas de entrenamiento por temporada.

Los datos fueron recogidos en casi la totalidad de los entrenamientos específicos de carrera a lo largo de la temporada que el deportista realizó conforme al criterio de su entrenador. Además de la recogida de información que caracteriza cada entrenamiento (volumen e intensidad) y el registro de salto CMJ y frecuencia cardíaca durante las sesiones, se realizaron diversos test o pruebas de rendimiento a lo largo de cada una de las temporadas, ubicadas en momentos puntuales dentro de la planificación del deportista.

Muestra

La muestra del presente estudio está constituida por un único atleta de 800 metros de nivel internacional, participante en campeonatos de Europa, del Mundo y Juegos Olímpicos.

Al inicio del estudio el sujeto tenía 28 años, medía 1,84 metros de altura y pesaba 72,1 kg. El deportista llevaba compitiendo a alto nivel desde hace más de 8 años y entrenando de forma específica y sin interrupciones más de 15 años. El sujeto contaba con amplia experiencia en la realización de pruebas de valoración relacionadas con su especialidad deportiva, tanto de laboratorio como de campo. El sujeto, una vez informado del propósito del estudio y los procedimientos metodológicos que se llevaron a cabo, dio el

consentimiento de participación por escrito mediante la firma del *consentimiento informado* (Anexo 2).

Variables objetos de estudio

- Variable independiente:

Como variable independiente de esta investigación, se utilizó la **carga de entrenamiento** de carrera del deportista. Esta carga de entrenamiento se cuantificó como resultado del producto de la intensidad con respecto a la velocidad aeróbica máxima (VAM) y el volumen expresado por la distancia recorrida en kilómetros, en cada sesión. Al resultado de este producto se le denominó “*índice de carga*” (IC).

Para analizar la fuerza de cada componente sobre el propio valor de IC, se analizó la relación entre ellos. El IC mostró una relación negativa significativa con la intensidad media y positiva con el volumen. En la tabla 5.2 se indican las relaciones obtenidas en cada una de las temporadas analizadas.

Tabla 5.2. Correlaciones entre índice de carga semanal y la intensidad y el volumen semanal

	Intensidad (%VAM)	Volumen (min)
IC (2015) n= 165	-0,861***	0,996***
IC (2016) n= 130	-0,919***	0,989***
IC (2017) n= 151	-0,806***	0,994***
IC (2017) n= 113	-0,882***	0,994***

IC: Índice de carga; PC: pista cubierta; AL: aire libre; VAM: Velocidad aeróbica máxima; min: minutos.

*** p<0,001

- Variables dependientes:

Como variables independientes se utilizaron la evolución del salto vertical con contra movimiento (CMJ), la pérdida de CMJ en la sesión, valoración subjetiva de la condición física (VSCF), la frecuencia cardíaca (FC), además de indicadores de fuerza, velocidad y potencia aeróbica y anaeróbica:

- Velocidad aeróbica máxima (VAM) ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
- Tiempo en 300 m (s)
- Tiempo en 20 m (s)
- Velocidad media propulsiva (VMP) en el ejercicio de sentadilla completa ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

- Control de variables contaminantes

Las posibles variables contaminantes que han podido afectar a los resultados del presente estudio hacen referencia a:

- Validez de los instrumentos: descrito previamente en la metodología del **Estudio Preliminar** (apartado 5.1).
- Ejecución técnica y cumplimiento de los protocolos de evaluación: Este aspecto se controla debidamente en el momento de realización de los tests y en cada una de las sesiones programadas. Dado que el deportista tenía amplia experiencia en la realización de las diferentes pruebas y test realizados durante el estudio, es razonable aceptar que el efecto de aprendizaje no ha existido. Además, todas las sesiones de entrenamiento y evaluación que formaron parte de este estudio llevaron a cabo bajo la atenta supervisión del equipo de investigadores.
- Condiciones ambientales: Las variables situacionales se minimizaron dentro de las posibilidades de un estudio longitudinal de estas características dado que las sesiones de entrenamiento realizadas por el deportista se realizan en exterior y, por tanto, fueron variando sus condiciones (temperatura y humedad) en función del momento del año en el que se encontraba. No obstante, se intentó que el deportista mantuviera sus sesiones de entrenamiento sin variaciones constantes (hora del día) durante largos periodos de tiempo dentro de cada temporada. Las pruebas de evaluación de la condición física realizadas periódicamente se realizaron siempre en las mismas condiciones (hora del día, condiciones de temperatura y humedad de la sala y ausencia de actividad física previa los días de realización de los test ni el día previo al comienzo de ellos). Dado el nivel deportivo del sujeto, los periodos de descanso nocturnos y diurnos y las pautas dietéticas estaban claramente estructurados en una rutina que formaba parte del día a día del deportista. Durante todo el periodo analizado, no se modificaron por lo que, de nuevo, es razonable aceptar que no hubo influencia de estos factores en los resultados del estudio.

Evaluaciones y pruebas físicas

- Antropometría

Con el objeto de describir la muestra y analizar su evolución durante el estudio, en cada semana de valoración se realizó una evaluación antropométrica del sujeto realizada tal como han sido descritas anteriormente en el **Estudio Preliminar** (apartado 5.1).

- Salto vertical con contra movimiento (CMJ)

El CMJ se realizó siguiendo el mismo procedimiento anteriormente descrito en el **Estudio Preliminar** (apartado 5.1).

- Test de valoración subjetiva de la condición física (VSCF)

La VSCF es una variable de creación propia que pretendía representar un índice subjetivo de buen rendimiento expresado por el deportista en una escala de 1 a 5, donde 1 equivale a “muy mal”, 2 a “mal”, 3 a “regular”, 4 a “bien” y 5 a “muy bien”. Se instruyó al sujeto para no confundir su valoración con otras más habituales como el grado de esfuerzo desarrollado en la sesión.

- Test de velocidad aeróbica máxima (VAM)

El test de VAM se realizó siguiendo el mismo procedimiento que el descrito para la prueba en tapiz rodante del **Estudio Preliminar** (apartado 5.1). La precisión del dispositivo se comprobó en cada temporada realizando una comprobación de todas las velocidades mediante la utilización de un tacómetro. La velocidad alcanzada al final de la prueba se tomó como referencia para cuantificar el rendimiento en el test y para la dosificación de la intensidad del entrenamiento.

- Test de tiempo límite

El test de tiempo límite pretende conocer cuál es el tiempo que el deportista es capaz de correr a la VAM. Esta prueba se realizó sobre un tapiz rodante (Valiant 2 Sport, LODE, Groningen, Netherland). El sujeto debía comenzar a correr a la velocidad máxima que alcanzaba en el test progresivo hasta el agotamiento realizado en el tapiz rodante con un 1% de pendiente y mantenerla el máximo tiempo posible. El tiempo que mantenía la velocidad se registró para su posterior análisis.

- Test de 300 metros

Esta prueba tiene como objetivo evaluar el rendimiento del deportista sobre una distancia de 300 metros, como indicador del rendimiento anaeróbica láctico del deportista. La prueba se llevaba a cabo en una pista de atletismo homologada según la normativa de competición (IAAF). El test consistió en la realización de una única repetición de 300 m a la máxima intensidad posible. Se registraron los parciales de 0-100 m, 100-200 m y 200-300 m, además del tiempo total 0-300 m. Para cronometrar los tiempos se utilizaron 4 pares de células fotoeléctricas (Polifemo Radio Light, Microgate, Italy) (**Figura 5.6**), cuyo funcionamiento consiste en la emisión de un láser sobre un reflector. Este dispositivo ha sido usado en numerosos estudios previamente (Earp & Newton, 2012). El tiempo se registró en segundos hasta las centésimas.

Las pruebas se realizaron con salida en posición bípeda estática, con la línea de salida situada a un metro de la primera célula fotoeléctrica. El resto de las células fotoeléctricas se situaron a los 100, 200 y 300 m (llegada) de la célula de salida.



Figura 5.6: Fotocélulas eléctricas (Polifemo Radio Light, Microgate, Italia)

- Test de 20 metros

Esta prueba consiste correr a la mayor velocidad posible sobre una distancia de 20 metros. Además del tiempo 0-20 m, se registraron los tiempos en 0-10 y 10-20 m. Para ello se utilizaron 3 pares de células fotoeléctricas (Polifemo Radio Light, Microgate, Italy). Las pruebas se realizaron con salida en posición bípeda estática, con la línea de salida situada a un metro de la primera célula fotoeléctrica. El resto de las células fotoeléctricas se situaron a los 10 y 20 m (llegada) de la célula de salida. Se realizaron dos intentos con una recuperación de 3 minutos entre cada una, registrando como resultado del test el

mejor de los tiempos.

- Medición de la concentración sanguínea de lactato (mmol/l)

La medición de la concentración sanguínea de lactato se realizó siguiendo el procedimiento que el descrito para la prueba en tapiz rodante del **Estudio Preliminar** (Apartado 5.1).

- Test de sentadilla completa

El objetivo de este test fue evaluar los niveles de fuerza en la musculatura extensora de las piernas del deportista. Esta prueba se realizó sobre una máquina tipo “*Smith*” (**Figura 5.7**). El rendimiento se medía por el cambio de velocidad ante las mismas cargas absolutas. Para la realización del test se utilizó un encóder lineal de velocidad (T-Force System; Ergotech, Murcia, España). En la prueba, el sujeto sujetaba una barra que descansaba sobre la parte alta de la espalda. Desde esa posición, se realizaba una flexión controlada de rodillas y caderas hasta que los muslos sobrepasaban el plano horizontal y alcanzaba el contacto entre la parte posterior de los muslos y los gemelos, momento en el que se realiza una extensión de rodillas y cadera a la máxima velocidad posible hasta alcanzar la posición inicial y sin despegarse del suelo durante el movimiento (Figura X). Tras un calentamiento de 5 minutos de carrera suave, 5 minutos de ejercicios de movilidad articular y varias repeticiones con cargas ligeras, la carga inicial se estableció en 30 kg y fue aumentando de 10 en 10 kg hasta que la velocidad media propulsiva (VMP) alcanzaba aproximadamente $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Como resultado del test, en cada carga levantada correctamente se registraba la repetición con la mayor VMP. El tiempo de recuperación entre cargas osciló entre 2 minutos y 30 segundos y 3 minutos.



Figura 5.7: Máquina tipo “Smith”

- Test de salto vertical con cargas (CMJc)

Este test se realizó en una máquina tipo “Smith”. El sujeto se colocaba de pie y sujetaba la barra apoyándola sobre la parte alta de la espalda. Desde esa posición, realizaba un salto con contra-movimiento, según se ha descrito previamente, pero con las manos sobre la barra. El sujeto comenzaba el test con una carga de 20 kg, que se aumentaba progresivamente de 10 en 10 kg hasta que la velocidad máxima en la fase concéntrica del salto descendiera por debajo de $2,40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Esta velocidad máxima equivale aproximadamente a 20 cm de altura de salto. La carga no se aumentaba más para evitar el riesgo de lesión y por la disminución de la fiabilidad a partir de alturas inferiores a los 20 cm de salto aproximadamente (Viitasalo, 1985). De cada carga levantada se registró la velocidad máxima de la fase concéntrica como indicador del rendimiento en la prueba. El tiempo de recuperación entre cargas osciló entre 2 minutos y 30 segundos y 3 minutos.

Procedimientos

Las mediciones realizadas para esta investigación se pueden dividir en dos grupos: 1) aquellas que se realizaron de manera continua durante los entrenamientos del deportista, y 2) las pruebas de evaluación de la condición física realizadas de manera periódica en diversos momentos de la temporada.

1.1.1. Registros continuos

Las siguientes pruebas se realizaron de manera habitual en las sesiones (569) llevadas a cabo por el deportista como parte de su entrenamiento para la competición.

- Registro del salto vertical durante las sesiones de entrenamiento

Durante el estudio se midió el CMJ antes, durante y al final de cada esfuerzo en casi la totalidad de las sesiones de entrenamiento de carrera realizadas por el deportista. Antes de realizar el salto inicial, se realizaba un calentamiento conforme a la rutina habitual de corredores de medio-fondo: 10-15 minutos de trote progresivo, ejercicios de movilidad y 3-4 aceleraciones de 50 a 80 metros a una intensidad entre el 80% y el 90% de la percepción de esfuerzo del deportista, con dos minutos de recuperación entre ellos. Además, se realizó un calentamiento específico para el salto consistente en 10 sentadillas sin carga adicional y 5 saltos CMJ en progresión. El salto que se medía antes del comienzo de la parte principal de la sesión se consideraba el CMJ inicial, a partir del cual se medía la pérdida de salto durante el entrenamiento. El resultado del test en cada uno de los momentos medidos fue la media de 3 saltos correctamente ejecutados. Al inicio del entrenamiento, los 3 saltos se realizaron con una recuperación de 30 segundos entre cada uno de ellos. Durante el entrenamiento y al final del mismo los 3 saltos se realizaron de manera inmediata (menos de 45 segundos) tras la finalización de cada esfuerzo, con un intervalo de unos 5 segundos entre cada uno de los saltos. Además del registro del valor del CMJ, para cuantificar el grado de fatiga inducido por la sesión de entrenamiento, se calculó el porcentaje de pérdida en cada medida con respecto al salto inicial.

- Registro de la valoración subjetiva de la condición física (VSCF)

Los datos de VSCF fueron registrados diariamente por el deportista tras la realización de las diferentes sesiones de entrenamiento a lo largo de toda la temporada. Para ello, el deportista debía completar un formulario al finalizar cada sesión de entrenamiento donde

indicaba la percepción de rendimiento que había tenido en dicha sesión.

1.1.2. Registros periódicos

Se programaron distintas pruebas de valoración de la condición física cada 4-6 semanas en función de la temporada. En la temporada 2016 se realizaron pruebas de VAM, tiempo límite y fuerza (CMJ, sentadilla y saltos con carga). Durante la temporada 2017 y 2018, además de los anteriores, se añadieron los test de 300 m y 20 m. La periodicidad de estas valoraciones fue alterada por sufrir el deportista diversas lesiones especialmente en las temporadas 2017 y 2018, lo cual obligó a cancelar algunas de ellas. La programación de las pruebas realizadas se presenta en la **tabla 5.3**.

Tabla 5.3: Resumen de la programación de los test de valoración de rendimiento durante cada temporada

	Temporada 2016	Temporada 2017	Temporada 2018
Octubre		- VAM - 20m y Fuerza - Tiempo límite - 300 m	- VAM - 20m y Fuerza - Tiempo límite - 300 m
Noviembre	- VAM, - Fuerza - Tiempo límite		
Diciembre	- VAM, - Fuerza - Tiempo límite	- VAM - 20m y Fuerza - Tiempo límite - 300 m	- VAM - 20m y Fuerza - Tiempo límite - 300 m
Enero	- VAM, - Fuerza - Tiempo límite		
Marzo	- VAM, - Fuerza - Tiempo límite		
Mayo	- VAM, - Fuerza - Tiempo límite		
Julio	- VAM, - Fuerza - Tiempo límite	- VAM - Tiempo límite	

Todos los test de valoración de la condición física se realizaron en varios días en una misma semana en función de la temporada. A continuación, se muestra el esquema de realización de los tests en las distintas temporadas (**tabla 5.4**).

Tabla 5.4. Ejemplo de una semana de evaluación en función de la temporada.

Temporada 2016				
Día 1	Día 2	Día 3		
Test VAM	Test Fuerza (CMJ, CMJc y sentadilla)	Test tiempo límite		
Temporada 2017 & 2018				
Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5
Test VAM	Test 20 m Test Fuerza (CMJ, CMJc y sentadilla)	Test 300 m	Recuperación	Test tiempo límite

VAM: Velocidad aeróbica máxima; CMJ: salto con contramovimiento; CMJc: saltos con cargas

- Registro de la velocidad aeróbica máxima

El test de velocidad aeróbica máxima (VAM) se llevó a cabo cada 4-6 semanas durante la temporada 2016. La temporada 2017 y 2018 se iniciaron con la misma frecuencia, pero en ambas hubo que suspender gran parte de las pruebas programadas por sufrir el deportista diversas lesiones. Como se ha indicado, los datos de la velocidad aeróbica máxima registrados fueron las velocidades máximas alcanzadas al final de cada test.

- Registro del tiempo límite

El test de tiempo límite (Tlímite), al igual que en el test de VAM, se llevó a cabo cada 4-6 semanas durante la temporada 2016 y con las modificaciones anteriormente mencionadas en las dos temporadas siguientes.

- Registro del tiempo en 300m

El test de 300 metros se incluyó en las temporadas 2017 y 2018. En ellas estaba previsto realizarlas siguiendo la secuencia de cada 4-6 semanas del resto de pruebas, pero al igual que anteriormente, no pudo realizarse en todas las ocasiones. Previo al inicio del test, el deportista realizaba un calentamiento conforme a la rutina habitual de corredores de medio-fondo descrita previamente. A continuación, se realizaba el registro del CMJ inicial y tras 3' de recuperación, el test de 300 m. El sujeto se colocaba de pie, un metro por detrás de la línea de salida e iniciaba la prueba de manera libre. El tiempo sobre la distancia y sobre cada uno de los parciales era registrado por el sistema de medición de fotocélulas. Sólo se realizó un intento. El reglamento de competición de atletismo no establece necesidad de medición de la velocidad del viento en pruebas que superen la distancia de 200 m, no obstante, durante la realización de estas pruebas se controló la

velocidad del viento mediante un anemómetro homologado con el fin de descartar alguna influencia del viento en los resultados. Para realizar la medición, se siguió la normativa de competición, colocando el anemómetro adyacente a la calle 1 a 50 metros de la línea de meta, realizando la medición durante 10 segundos cuando el deportista entraba en la recta. En todas las mediciones, el viento estuvo dentro de los límites reglamentarios ($+ 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

- Registro del tiempo en 20 m

Lo descrito para el test de 300 m es aplicable para la prueba de 20 m. La principal diferencia es que, en esta prueba, el sujeto realizaba dos repeticiones con 3 minutos de recuperación entre ambas, registrando el mejor tiempo obtenido.

Entrenamiento

Durante el periodo de estudio, el sujeto llevó a cabo un programa de entrenamiento habitual para un deportista de su modalidad deportiva. Durante la temporada 2015 el deportista realizó un total de 42 semanas de entrenamiento, 38 semanas en la temporada 2016, 40 semanas en la temporada 2017 y 37 semanas en la temporada 2018. Como norma general, el deportista distribuía sus semanas de entrenamiento en 3-5 sesiones de carrera, 2 sesiones de fuerza y un día de descanso (**Tabla 5.5**). La intensidad de entrenamiento de carrera, excluidos los calentamientos y las sesiones destinadas a recuperación, se distribuyó con distinta proporción entre el 88% y el 150% de la VAM (67,3% y 115% de la velocidad de competición respectivamente).

En cuanto al entrenamiento de fuerza, este consistió básicamente en los ejercicios de sentadilla, saltos con cargas del 50 al 65% de peso con el que el sujeto podía asaltar unos 20 cm (CMJc) y diferentes tipos de saltos (CMJ y segundos de triple), así como arrastres de 20-30 m con aproximadamente el 10% del peso corporal del atleta. También se realizaron algunos ejercicios compensatorios de miembro superior (press de banca y tracciones) y de la musculatura del abdomen.

Tabla 5.5: Ejemplo de la distribución de las cargas en una semana de entrenamiento del deportista (temporada 2016, semana 5)

Sesión	Entrenamiento	Intensidad (%VAM)	Volumen (min)
1	5x5'/R-2'	90,2	25
2	Fuerza (Sentadilla, CMJc, CMJ, Arrastres, PB, Tr, Abd)		
3	20x150 m/R-90''	123,2	6,96
4	Fuerza (Sentadilla, CMJc, CMJ, 2º triple, PB, Tr, Abd)		
5	6x5'/R-2'	90,2	30
6	10x200 m/R-2'	125	4,56
7	Descanso		
Tiempo total de entrenamiento			66,52

Abreviaciones: R: recuperación; CMJc: saltos con cargas; PB: press banca; Tr: tracciones; Abd: Abdomen

En la **figura 5.8** se muestra, como ejemplo, la distribución del tiempo de entrenamiento realizado en cada zona de intensidad relativa a la velocidad aeróbica máxima (%VAM), durante la temporada 2015 tanto en pista cubierta (PC) como en aire libre (AL).

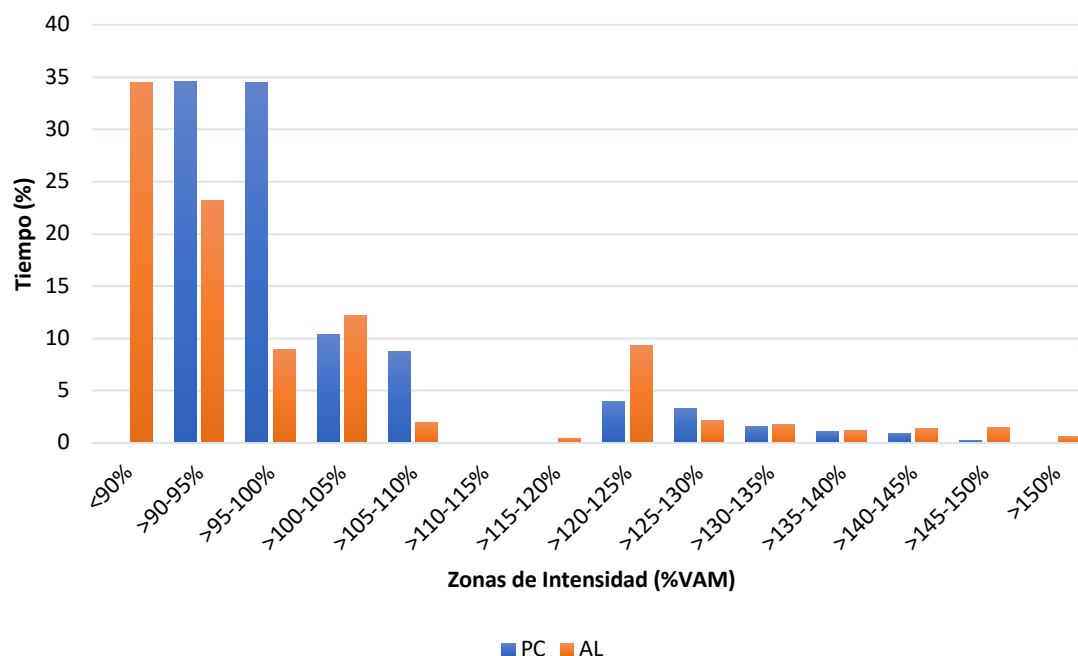


Figura 5.8. Distribución del tiempo de entrenamiento según las zonas de intensidad en la temporada 2015.

El análisis de la carga de entrenamiento y su relación con los indicadores de fatiga y los resultados objeto de esta investigación, se detallarán en el apartado “Resultados” de este documento (**Tabla 6.2 y 6.3**).

Análisis estadístico

Para la descripción de los resultados se utilizaron cálculos estandarizados de la media y la desviación típica (DT). Para comprobar la relación entre variables se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson. Se aplicó la correlación parcial para controlar el posible efecto de terceras variables cuando se consideró necesario. Los análisis fueron realizados usando el paquete estadístico SPSS versión 25 (SPSS INC., Chicago, IL). El nivel de significación estadístico se estableció para una probabilidad de error máxima igual o inferior al 5% ($p \leq 0,05$).

Resultados

6. RESULTADOS

6.1. Estudio preliminar

En la tabla 6.1 se presentan los resultados de las variables analizadas en corredores de medio-fondo de nivel nacional e internacional en el test incremental en tapiz rodante y en el test incremental en pista. Las variables tiempo alcanzado en la prueba y la velocidad final del test mostraron diferencias significativas ($P < 0,001$) entre ambas superficies a favor del tapiz rodante. No se encontraron diferencias significativas en las variables representativas de esfuerzo FC media, lactato o pérdida de CMJ pre-post esfuerzo.

Tabla 6.2: Resultados de las distintas variables analizadas en un test incremental realizado en pista y un test incremental realizado en tapiz rodante en **hombres** corredores de medio fondo de nivel nacional e internacional.

	Pista	Tapiz rodante	Dif (%)
Tiempo (min)	23,7 \pm 2,4	27,9 \pm 3,1***	13,3 \pm 3,3
Velocidad (km·h⁻¹)	19,8 \pm 1,2	21,9 \pm 1,6***	8,1 \pm 2,3
CMJ pre (cm)	39,4 \pm 6,5	39,7 \pm 6	
CMJ pérdida (%)	-4,0 \pm 5,6	-3,1 \pm 5,3	
Lactato (mmol/l)	12,7 \pm 3,4	12,6 \pm 2,6	
FCmáx (ppm)	183,8 \pm 10,5	187,3 \pm 9,8*	
FCmed (ppm)	150,9 \pm 14,4	153,1 \pm 15,6	

Abreviaciones: CMJpre: CMJ inicial; CMJpérdida: Pérdida de CMJ pre-post sesión; FCmáx: Frecuencia cardíaca máxima; FCmedia: Frecuencia cardíaca media.

*** $p < 0,001$

6.2. Estudio principal

Variables analizadas

A continuación y modo de ejemplo, se muestra un resumen por semanas de las distintas variables analizadas a lo largo de la temporada 2015 tanto en pista cubierta (tabla 6.2) como en aire libre (tabla 6.3). Datos similares se obtuvieron el resto de temporadas.

Tabla 6.2: Tabla resumen de las variables analizadas durante la temporada 2015 de pista cubierta.

Semanas	Número sesiones		Int. media (%VC)	Int media (%VAM)	Volumen (min)	Volumen (m)	Índice de carga	Promedio CMJpre	Mejor CMJpre	Peor CMJpre	Pérdida máx. CMJ (%)	Pérdida mín. CMJ (%)	Pérdida media CMJ (%)
	Realizadas	Medición CMJ											
Semana 1	2	2	68,9	90,0	35,0	11025,0	31,5	53,2	53,3	53,1	5,84	5,44	5,64
Semana 2	3	3	68,9	90,0	65,0	20475,0	58,5	53,1	53,7	52,7	7,94	3,80	5,87
Semana 3	3	3	68,9	90,0	65,0	20475,0	58,5	51,7	52,2	50,9	6,48	3,07	4,73
Semana 4	3	3	68,9	90,0	97,0	30555,0	87,3	51,6	51,7	51,5	6,38	5,05	5,72
Semana 5	3	3	72,7	95,0	51,0	16957,5	48,5	49,3	51,3	47,9	8,38	3,70	5,77
Semana 6	4	4	73,1	95,5	64,6	21600,0	61,7	48,9	50,1	47,5	6,59	2,26	4,35
Semana 7	3	3	73,3	95,8	50,8	17025,0	48,6	50,4	51,6	48,6	5,23	3,92	5,25
Semana 8	4	4	76,7	100,1	44,8	15707,7	44,9	51,9	52,4	51,1	10,96	6,17	8,10
Semana 9	3	2	77,0	100,6	16,3	5745,0	16,4	51,3	51,5	51,0	9,51	9,51	9,51
Semana 10	4	4	77,6	101,4	42,8	15177,0	43,4	51,6	53,3	49,7	12,16	8,65	9,88
Semana 11	4	4	80,0	104,5	27,9	10200,0	29,1	51,9	52,2	51,2	15,13	4,10	9,32
Semana 12	4	4	82,8	108,1	28,6	10825,0	30,9	52,2	54,3	50,6	15,42	14,92	13,73
Semana 13	4	4	81,8	106,8	30,1	11242,5	32,1	52,9	54,2	51,1	13,65	8,35	12,47
Semana 14	4	4	82,5	107,8	31,6	11925,0	34,1	55,4	54,0	53,9	32,66	9,81	16,18
Semana 15	3	3	101,8	132,9	5,1	2350,0	6,7	54,7	55,9	52,8	23,29	12,88	18,08
Semana 16	4	4	83,6	109,2	33,2	12710,0	36,3	54,0	55,6	51,7	23,11	8,27	15,46
Semana 17	4	4	99,1	129,4	8,2	3730,0	10,7	55,8	56,3	55,4	5,23	5,23	5,23
Semana 18	4	4	102,3	133,6	26,0	12170,2	30,4	54,0	55,5	53,1	16,76	2,16	9,46
Semana 19	4	1	97,6	127,5	9,7	4310,1	12,3	56,3	57,6	55,1	20,15		
Semana 20	3	3	87,7	114,5	22,0	8800,5	25,1	54,8	56,6	53,2	24,00	5,08	13,34
Semana 21	2	1	101,5	132,6	4,0	1850,6	5,3	56,7	56,7	56,7	20,28		
Media	72	67	82,6	107,9	36,13	12612,19	35,82	52,93	53,81	51,85	13,77	6,44	9,37
(±) Des. Tipica					23,56	7161,01	20,50	2,19	2,12	2,37	7,73	3,54	4,34

CMJ: salto con contramovimiento; VC: velocidad de competición; VAM: Velocidad aeróbica máxima; Min: minuto; M: metros; CMJpre: CMJ inicial

Tabla 6.3: Tabla resumen de las variables analizadas durante la temporada 2015 de aire libre.

Semanas	Número sesiones		Int. media %VC	Int media %VAM	Volumen (min)	Volumen (m)	Índice carga	Promedio CMJpre	Mejor CMJpre	Peor CMJpre	Pérdida máx. CMJ (%)	Pérdida mín. CMJ (%)	Pérdida media CMJ (%)
	Realizadas	Medicion CMJ											
Semana 1	4	3	67,9	88,6	84,6	26249,2	75,0	52,4	54,5	51,1	9,4	0,6	4,3
Semana 2	3	1	67,4	88,0	90,0	27720,0	79,2	48,9	48,9	48,9	21,2	21,2	
Semana 3	3	2	68,9	90,0	74,0	23310,0	66,6	55,3	57,3	53,2	9,4	6,5	7,9
Semana 4	3	3	70,8	92,5	45,5	14425,0	42,1	56,9	58,2	55,5	7,4	0,0	3,7
Semana 5	5	4	73,6	96,1	61,4	20649,7	59,0	55,6	56,3	53,8	10,9	0,5	5,4
Semana 6	5	5	73,8	96,4	60,6	20457,4	58,4	55,4	56,0	54,5	9,8	0,0	4,3
Semana 7	3	3	77,6	101,3	20,6	7300,0	20,9	56,1	57,3	54,6	7,0	3,5	5,7
Semana 8	5	4	80,2	104,8	32,4	11869,6	33,9	55,3	56,3	54,8	11,1	8,0	9,1
Semana 9	5	4	86,0	112,3	23,4	9214,5	26,3	56,4	57,9	55,6	12,9	5,8	9,7
Semana 10	4	4	83,8	109,5	22,5	8641,8	24,7	56,8	58,2	56,1	11,9	2,5	8,3
Semana 11	5	4	87,9	114,8	22,8	9170,5	26,2	57,7	60,2	55,2	16,4	10,1	12,9
Semana 12	5	4	94,5	123,4	20,1	8665,3	24,8	58,1	61,4	56,6	16,6	3,4	10,8
Semana 13	5	3	97,5	127,4	11,5	5143,7	14,7	58,4	60,2	56,6	14,5	3,5	9,8
Semana 14	5	1	97,4	127,2	13,3	5914,7	16,9	58,2	60,5	57,2	18,4		
Semana 15	6	4	91,0	118,9	22,9	9517,5	27,2	57,9	59,0	57,3	20,1	3,1	13,7
Semana 16	5	0	95,7	125,0	8,9	3902,2	11,1	59,9	60,9	57,6			
Semana 17	5	2	99,8	130,3	9,7	4403,2	12,6	58,9	61,4	56,6	20,3	9,3	14,8
Semana 18	5	3	85,4	111,6	29,7	11614,1	33,2	60,1	62,9	57,9	10,7	8,1	9,8
Semana 19	5	2	98,2	128,3	11,2	5041,5	14,4	60,8	62,3	59,7	12,7	8,4	10,6
Semana 20	3	0	96,4	126,0	5,8	2551,7	7,3	54,4	54,4	54,4			
Semana 21	5	4	86,0	112,3	35,3	13851,7	39,6	57,0	58,0	55,0	14,5	3,3	8,8
Media	94	60	85,9	112,2	33,63	11886,34	34,00	56,68	58,20	55,34	13,44	5,43	8,81
Des. Tipica(±)					25,73	7566,57	21,63	2,69	3,23	2,37	4,39	5,13	3,31

CMJ: salto con contramovimiento; VC: velocidad de competición; VAM: Velocidad aeróbica máxima; Min: minuto; M: metros; CMJpre: CMJ inicial

Efectos de la carga de entrenamiento en la sesión sobre la pérdida de salto vertical

En la **tabla 6.4** se presentan distintas correlaciones en cada una de las temporadas analizadas del IC y el CMJ inicial (CMJpre) con la pérdida de CMJ en la sesión (CMJpérdida) y la VSCF. El IC mostró una relación negativa significativa con la pérdida de CMJ en la sesión y el CMJ inicial mostró una relación negativa significativa con la pérdida de CMJ en la sesión y positiva con la VSCF en la sesión. Al controlar el CMJ inicial de la sesión, las correlaciones se mantuvieron en valores muy semejantes y significativos, siendo en algunos casos ligeramente menores y en otros mayores.

Tabla 6.4: Correlaciones significativas entre las variables índice de carga, CMJ inicial, pérdida de CMJ en la sesión y valoración subjetiva de la condición física **por sesión** en cada temporada completa.

	CMJpérdida	VSCF
Temporada 2015		
IC (N=112)	-0,535***	
IC control CMJpre (N=109)	-0,482***	
CMJpre (n=130)	0,297**	0,202**
Temporada 2016		
IC (N=103)	-0,733***	
IC control CMJpre (N=100)	-0,683***	
CMJpre (n=118)	0,595***	0,502***
Temporada 2017		
IC (N=96)	-0,444***	
IC control CMJpre (N=93)	-0,529***	
CMJpre (n=103)	0,390***	0,274*
Temporada 2018		
IC (N=65)	-0,742***	
IC control CMJpre (N=62)	-0,681***	
CMJpre (n=65)	0,539***	
Todas las temporadas		
IC (N=391)	-0,634***	
IC control CMJpre (N=388)	-0,598***	
CMJpre (n=394)	0,343***	,333***

IC: índice de carga; CMJ: Salto con contramovimiento; CMJpre: CMJ inicial de la sesión; CMJpérdida: %pérdida de salto pre-post sesión; VSCF: valoración subjetiva de la condición física. * p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001

Cuando se diferenciaron los ciclos de pista cubierta y de aire libre dentro de cada temporada atlética completa, las relaciones entre el IC de la sesión y la pérdida de CMJ en la sesión siguieron siendo negativas significativas en todos los casos. Del mismo modo, la relación entre el CMJ inicial y la pérdida de CMJ y la VSCF en la sesión fue positiva significativa (o próximas a la significatividad). De nuevo, al controlar el CMJpre, el valor de la relación se mantuvo con valores semejantes en unos casos y en otros aumentó (tablas 6.5 y 6.6).

Tabla 6.5: Correlaciones entre las variables índice de carga, CMJ inicial en la sesión, pérdida de CMJ en la sesión y valoración subjetiva de la condición física **por sesión en la temporada de pista cubierta** de cada temporada (sólo se indican las relaciones significativas o próximas a la significatividad).

Pista cubierta	CMJpérdida	VSCF
Temporada 2015		
IC (N=57)	-0,582***	
IC control CMJpre (N=52)	-0,521***	
CMJpre (n=55)	0,585***	
Temporada 2016		
IC (N=55)	-0,746***	
IC control CMJpre (N=52)	-0,689***	
CMJpre (n=118)	0,691***	0,547***
Temporada 2017		
IC (N=68)	-0,442***	
IC control CMJpre (N=65)	-0,503***	
CMJpre (n=68)	0,485***	0,424***
Temporada 2018		
IC (N=50)	-0,743***	
IC control CMJpre (N=47)	-0,631***	
CMJpre (n=50)	0,747***	

IC: índice de carga; CMJ: Salto con contramovimiento; CMJpre: CMJ inicial de la sesión; CMJpérdida: %pérdida de salto en la sesión; VSCF: valoración subjetiva de la condición física.

* p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001 †Próximo a la significatividad estadística

Tabla 6.6: Correlaciones entre las variables índice de carga, CMJ inicial en la sesión, pérdida de CMJ en la sesión y valoración subjetiva de la condición física **por sesión en la temporada de aire libre** de cada temporada (sólo se indican las relaciones significativas).

Aire libre	CMJpérdida	VSCF
Temporada 2014/2015		
IC (N=57)	-0,524***	
IC control CMJpre (N=54)	-0,44***	
CMJpre (n=55)	0,371**	
Temporada 2015/2016		
IC (N=48)	-0,726**	
IC control CMJpre (N=45)	-0,601***	
CMJpre (n=62)	0,535**	0,642***
Temporada 2016/2017		
IC (N=28)	-0,445***	
IC control CMJpre (N=25)	-0,562***	
Temporada 2017/2018		
IC (N=15)	-0,684**	
IC control CMJpre (N=12)	-0,714**	

IC: índice de carga; CMJ: Salto con contramovimiento; CMJpre: CMJ inicial de la sesión; CMJpérdida: %pérdida de salto en la sesión; VSCF: valoración subjetiva de la condición física.

* p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001

Efecto de la carga de entrenamiento en la sesión sobre la recuperación de la capacidad de salto

Se analizó la relación entre el IC de una sesión y el salto vertical del siguiente día consecutivo de entrenamiento (24 horas tras el entrenamiento). Al analizar los valores de IC de las sesiones en conjunto, se encontró una relación negativa significativa con el CMJ a las 24 horas en las temporadas 2015, 2016 y 2017 (**tabla 6.7**).

Sin embargo, la distribución de los puntos representativos de los pares de datos comparados mostró también una tendencia curvilínea, de tal forma que se observó una relación positiva significativa cuando el valor de la carga era menor de 8 y negativa significativa con valores superiores a 8 (**tabla 6.7, figura 6.1 y 6.2**). Las relaciones en la temporada 2018 no fueron significativas, pero mantuvieron la misma tendencia que en el resto de las temporadas.

Tabla 6.7: Correlaciones entre el IC y el CMJ a las 24h por sesión con distintos valores de IC en cada una de las temporadas.

Temporada	CMJ24H			
	2015	2016	2017	2018
IC	-0,52* (n=30)	-0,443* (n=29)	-0,602** (n=39)	-0,288 (1) (n=16)
IC < 8	0,72*** (n=20)	0,63† p=0,09 (n=8)	0,51† p=0,051 (n=15)	0,11 (1) (n=4)
IC > 8	-0,689** (n=11)	-0,453* (2) (n=22)	-0,637*** (n=30)	-0,40 (1) (n=12)

Abreviaciones: IC: índice de carga; CMJ24h: CMJ inicial a las 24h.

* p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001 †Próximo a la significatividad estadística

(1) Relaciones no significativas pero que mantienen la misma tendencia.

(2) La relación encontrada en la temporada 2016 se dio con valores de IC de 6

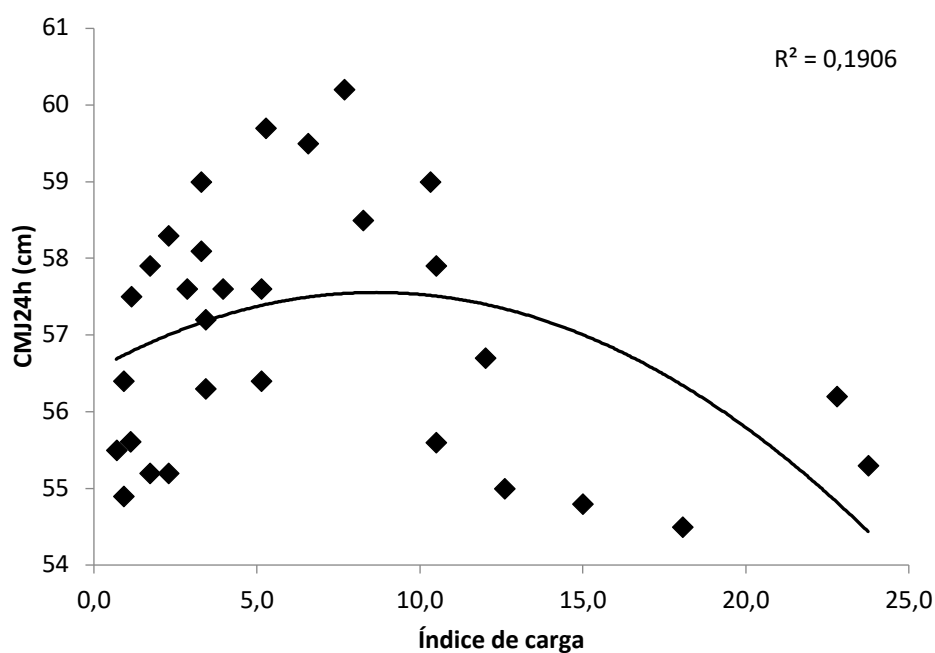


Figura 6.1: Evolución del IC y el CMJ24h en la temporada 2015.

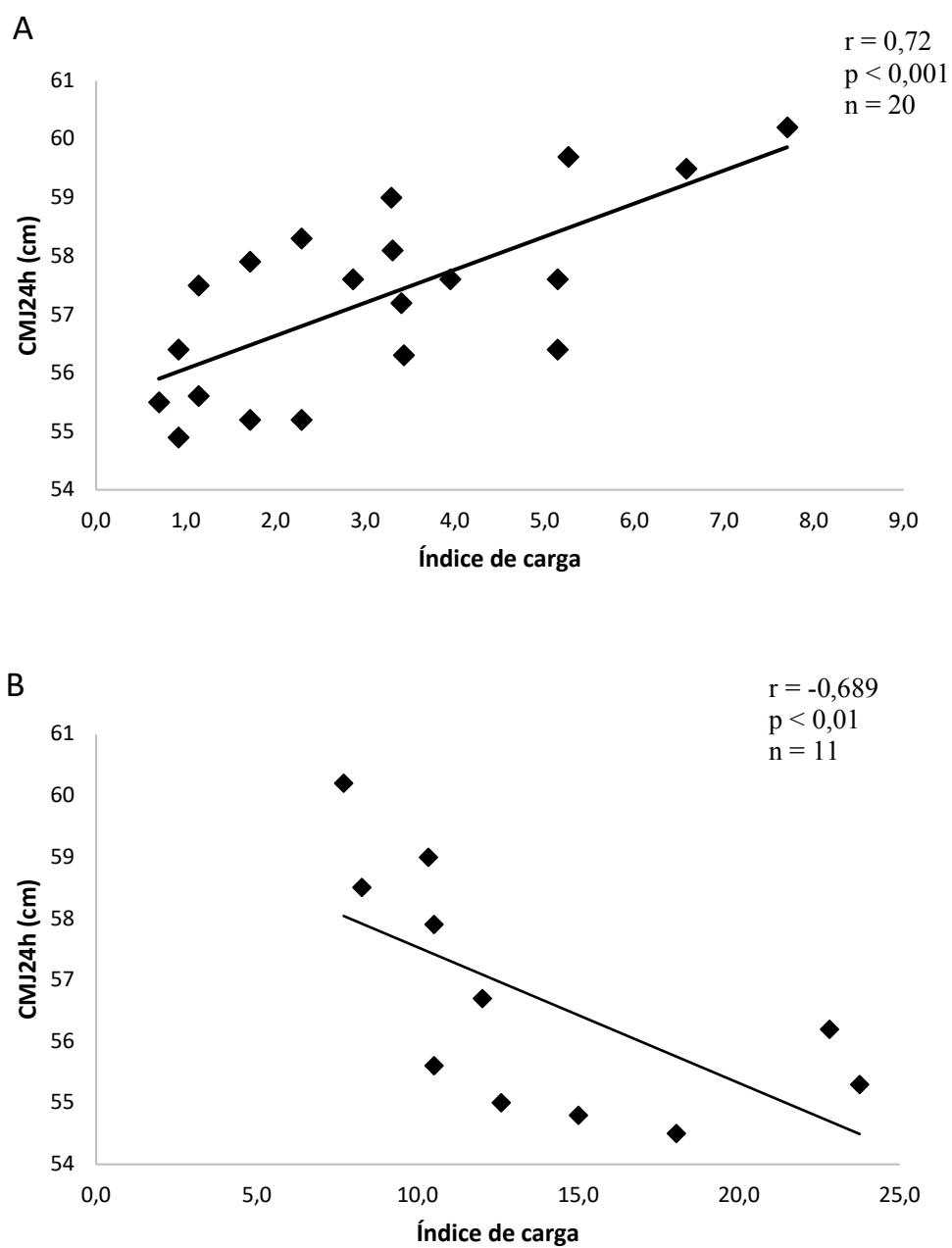


Figura 6.2: Evolución del IC y el CMJ24h en la temporada 2015 con valores de IC<8 (A) y con valores de IC>8 (B).

Efecto de la carga de entrenamiento semanal sobre distintas variables

Se analizó la relación entre los valores medios semanales de IC y los valores medios de CMJ inicial, VSCF y el CMJ inicial de la semana siguiente (**tabla 6.8**). En todos los casos se observó una relación negativa significativa o próxima a la significatividad.

Tabla 6.8: Correlaciones entre los **valores medios semanales** de índice de carga y el CMJ inicial, CMJ inicial de la siguiente semana y la valoración subjetiva de la condición física **por temporada**. (sólo se indican las relaciones significativas o próximas a la significatividad).

	CMJpresem	CMJpre_ss	VSCF
Temporada 2015			
ICsemanal (N=42)	-0,637***	-0,663***	-0,292† p=0,06
Temporada 2016			
ICsemanal (N=36)	-0,622***	-0,627***	-0,379*
Temporada 2017			
ICsemanal (N=21)	-0,594**	-0,621**	-0,576**
Temporada 2018			
ICsemanal (N=23)	-0,384*	-0,627**	-0,654**

ICsemanal: índice de carga medio semanal; CMJ: Salto con contramovimiento; CMJpresem: CMJ inicial medio semanal; CMJpre_ss: CMJ inicial de la semana siguiente; VSCF: valoración subjetiva de la condición física.

* p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001 †Próximo a la significatividad estadística

De la misma forma que ocurría cuando se analizó el IC por sesión, al analizar el ciclo de pista cubierta y aire libre dentro de cada temporada completa de manera independiente, la relación entre el IC medio semanal y las variables de CMJ inicial medio semanal, VSCF semanal y CMJ inicial de la semana siguiente se mantuvieron negativas significativas en todos los casos (**tabla 6.9 y 6.10**).

Tabla 6.9: Correlaciones entre los **valores medios semanales** de índice de carga y CMJ inicial, CMJ inicial de la siguiente semana y valoración subjetiva de la condición física en la temporada de **pista cubierta** de cada temporada. (sólo se indican las relaciones significativas o próximas a la significatividad).

Pista cubierta	CMJpresem	CMJpre_ss	VSCF
Temporada 2015			
ICsemanal (N=21)	-0,621**	-0,702***	-0,657*
Temporada 2016			
ICsemanal (N=16)	-0,614*	-0,672**	-0,499 *
Temporada 2017			
ICsemanal (N=19)	-0,598*	-0,623**	-0,616**
Temporada 2018			
ICsemanal (N=19)	-0,479*	-0,790***	-0,611 *

IC: índice de carga; CMJ: Salto con contramovimiento; CMJpresem: CMJ inicial medio semanal; CMJpre_ss: CMJ inicial de la semana siguiente; VSCF: valoración subjetiva de la condición física.

* p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001

Tabla 6.10: Correlaciones entre los **valores medios semanales** de índice de carga y CMJ inicial, CMJ inicial de la siguiente semana y valoración subjetiva de la condición física en la temporada de **pista aire libre** de cada temporada. (sólo se indican las relaciones significativas o próximas a la significatividad).

Aire Libre	CMJpresem	CMJpre_ss	VSCF
Temporada 2015			
ICsemanal (N=21)	-0,600**	-0,642***	-0,690**
Temporada 2016			
ICsemanal (N=19)	-0,445*	-0,593**	

IC: índice de carga; CMJ: Salto con contramovimiento; CMJpresem: CMJ inicial medio semanal; CMJpre_ss: CMJ inicial de la semana siguiente; VSCF: valoración subjetiva de la condición física.

* p<0,05, **p<0,01, *** p<0,001

Se analizó la relación entre los valores medios semanales de VSCF y los valores medios de CMJ inicial en la temporada 2016 (**tabla 6.11**). En ambos casos, se encontraron relaciones positivas significativas

Tabla 6.11: Correlaciones entre los **valores medios semanales** de VSCF y CMJ inicial en la temporada 2015

Temporada 2016	CMJpresem
Pista cubierta	
VSCF (N=16)	0,86***
Aire libre	
VSCF (N=16)	0,86***

VSCF: valoración subjetiva de la condición física medio semanal; CMJpresem: valores medios de CMJ inicial de la semana

*** p<0,001

Cambios en el rendimiento a lo largo de todo tiempo analizado

- Velocidad aeróbica máxima

Los resultados de los distintos tests de velocidad aeróbica máxima realizados por el deportista a lo largo de las temporadas se presentan en la tabla 6.13. En ella se indican los valores obtenidos en las siguientes variables: CMJ inicial y CMJ inmediatamente tras finalizar el test, la pérdida de salto durante el test y la FC máxima.

Tabla 6.12: Resultados de los test de velocidad aeróbica máxima a lo largo de todas las temporadas analizadas

	Tiempo (min)	Velocidad (km·h ⁻¹)	FCmáx (lpm)	CMJpre (cms)	CMJpost (cms)	CMJpérdida (%)
Temporada 2016						
Test 1	28,17	22,1	185	58	55,2	4,8
Test 2	29,18	22,6	185	56,3	52,6	6,6
Test 3	29,67	22,8	184	58,4	52,8	9,6
Test 4	30,52	23,26	182	59,4	53,0	10,8
Test 5	30,67	23,33	181	60,8	53,5	12,0
Test 6	30,12	23,06	185	57,6	50,6	12,2
Temporada 2017						
Test 1	29,67	22,8	181	56,3	51,2	9,1
Test 2	31,07	23,53	183	58,3	50,9	12,7
Temporada 2018						
Test 1	30,22	23,11	184	55,6	49,3	11,3
Test 2	30,32	23,41	186	55,5	47,0	15,3

Abreviaciones: CMJpre: Salto inicial; CMJpost: Salto tras finalizar el test; CMJpérdida: % pérdida de salto en el test

La evolución del rendimiento en el test de velocidad aeróbica máxima en la temporada 2016 se presenta en la figura 6.3.

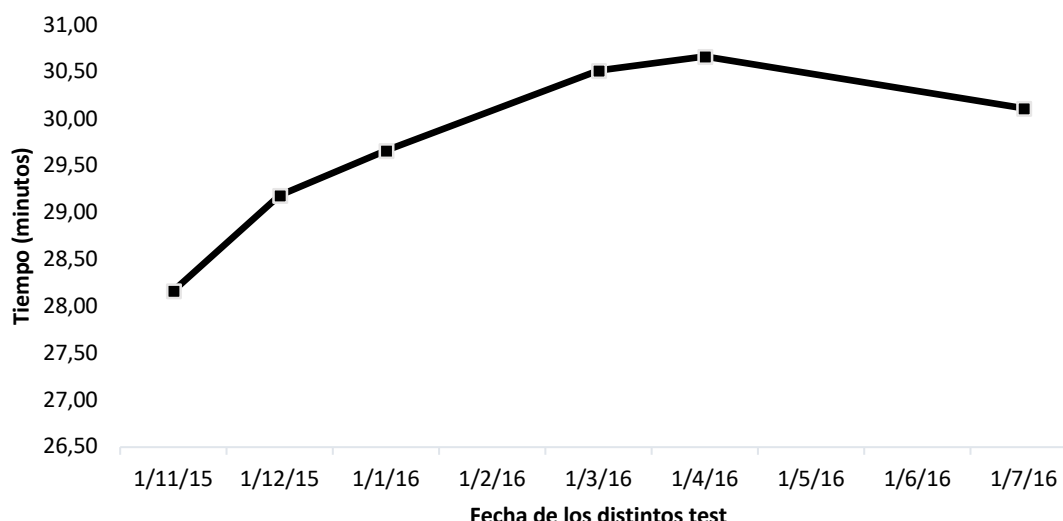


Figura 6.3: Evolución del rendimiento en el test de VAM durante la temporada 2016 completa

Se analizaron también las correlaciones entre el rendimiento en el test y la pérdida de salto vertical. Se encontró una relación positiva significativa entre el tiempo y la pérdida de salto pre-post test ($r = 0,86$, $p < 0,001$) y entre la velocidad alcanzada y la pérdida de salto pre-post test ($r = 0,93$, $p < 0,001$). Al controlar el CMJ inicial, las correlaciones se mantuvieron en valores muy semejantes y significativos ($r = 0,9$, $p < 0,001$; y $r = 0,94$, $p < 0,01$) para el tiempo y la velocidad, respectivamente.

- Tiempo límite

La **tabla 6.13** recoge los resultados de los distintos test de tiempo límite a la velocidad aeróbica máxima realizados por el deportista a lo largo de las temporadas. Las variables analizadas fueron: tiempo y distancia soportada a la VAM, CMJ inicial y CMJ tras finalizar el test, porcentaje de pérdida de salto vertical y FC máxima.

Tabla 6.13: Resultados de los test de tiempo límite realizados a lo largo de todas las temporadas analizadas.

	Tiempo (min)	Distancia (m)	FCmáx (ppm)	CMJpre (cms)	CMJpost (cms)	CMJpérdida (%)
Temporada 2016						
Test 1	4,98	1877,1	178	56,6	46,6	17,7
Test 2	7,07	2661,8	180	58,4	56,9	2,6
Test 3	7,15	2693,2	182	61,7	52,3	15,2
Test 4	6,73	2536,2	175	59,0	48,2	18,4
Test 5	7,37	2774,8	180	57,6	48,1	16,5
Temporada 2017						
Test 1	6,33	2385,6	177	56,6	45,6	19,4
Test 2	7,18	2705,7	177	57,3	46	19,7
Test 3	6,52	2454,6	180	52,5	45,9	12,6
Temporada 2018						
Test 1	6,17	2322,8	180	55,3	48,1	13,0
Test 2	6,75	2542,5	180	56,0	49	12,5

Abreviaciones: FCmáx: FC máxima; CMJpre: Salto inicial; CMJpost: Salto tras finalizar el test; CMJpérdida: % pérdida de salto en el test

- Test de 300 m

En la **tabla 6.14** se presentan los resultados de los tests de 300 m realizados en la temporada 2017 y 2018. Se recogieron los datos de tiempo en cada parcial de 100 m y en la distancia total, FC máxima, CMJ inicial, CMJ final y se calculó el porcentaje de pérdida de CMJ.

Tabla 6.14: Resultados de los diferentes test de 300m de las temporadas analizadas.

	T (s) 0-100 m	T (s) 0-200 m	T (s) 0-300 m	FCmáx (ppm)	CMJpre (cm)	CMJpost (cm)	CMJpérdida (%)
Temporada 2017							
Test 1	12,26	24,71	37,86	167	57,6	46,9	18,6
Test 2	11,8	24,12	37,49	163	58,3	44,4	23,9
Temporada 2018							
Test 1	12,24	24,53	37,17	170	56,9	43,3	23,9
Test 2	12,32	24,52	36,75	171	58,0	44,11	23,9

Abreviaciones: T: tiempo; FCmáx: FC máxima; CMJpre: Salto inicial; CMJpost: Salto tras finalizar el test; CMJpérdida: pérdida de salto en el test (%).

- Test de fuerza

Los resultados de las valoraciones realizadas en el test de fuerza en cada una de las temporadas analizadas se presentan en la **tabla 6.15**. Los datos mostrados corresponden a la velocidad máxima con la carga de 60 kg en el ejercicio de saltos con cargas, la velocidad media propulsiva con 70 kg en el ejercicio de sentadilla, el CMJ y el tiempo en el test de velocidad de 0-10 m y 0-20 m.

Tabla 6.15: Resultados de las pruebas realizadas en los tests de fuerza de las temporadas analizadas.

	Saltos con carga (Vmáx 60 kg)	Sentadilla (VMP 70 kg)	CMJpre (cm)	T 0-10 m (s)	T 0-20 m (s)
Temporada 2016					
Test 1	2,38	1,03	54,4		
Test 2	2,49	1,12	54,9		
Test 3	2,44	1,12	57,6		
Test 4	2,50	1,17	55,3		
Test 5	2,44	1,19	55,9		
Temporada 2017					
Test 1	2,28	1,08	54,3	1,76	2,99
Test 2	2,45	1,17	56,2	1,74	2,98
Temporada 2018					
Test 1	2,34	1,12	53,3	1,76	2,98
Test 2	2,30	1,11	53,0	1,75	2,97

Abreviaciones: Vmáx: Velocidad máxima; VMP: Velocidad media propulsiva; FC máxima; CMJpre: Salto inicial; T: Tiempo.

Se analizaron las correlaciones entre los datos de los diferentes test. Se encontró una relación positiva significativa entre el tiempo y la velocidad en el test de VAM con la VMP en el ejercicio de sentadilla con la carga de 70 kg ($r = 0,87$, $p < 0,01$) y con el tiempo límite ($r = 0,66$, $p < 0,05$). Se encontró una relación negativa significativa entre la velocidad máxima con 60 kg en el ejercicio de salto con cargas y el parcial 0-100 m en el test de 300 m ($r = -0,95$, $p < 0,05$) y una relación próxima a la significatividad ($r = -0,91$, $p = 0,09$) entre la VMP en sentadilla y el mismo parcial 0-100 m. Se encontró una relación negativa significativa entre el tiempo límite y el parcial 0-10 m del test de 20 m ($r = -0,98$, $p < 0,01$).

Evolución de distintas variables previas al mejor y peor resultado en los test

Se analizó la evolución del IC medio semanal de las 4 semanas previas al mejor y peor resultado en el test de VAM y tiempo límite (**tabla 6.16, figura 6.4**). El IC mostró valores más altos en cada una de las 4 semanas previas y en el conjunto de las 4 semanas (103,6) al mejor resultado en los test de VAM y tiempo límite respecto a cuando se alcanzó el peor resultado en dichos tests (59,0).

Tabla 6.16: Evolución del IC medio semanal las 4 semanas previas al mejor y peor test de VAM

	Peor VAM	Mejor VAM
Semana	IC	IC
4	66,93	88,87
3	52,86	117,24
2	56,92	143,23
1	59,4	65,11

Abreviaciones: VAM: Velocidad aeróbica máxima; IC: Índice de carga medio semanal.

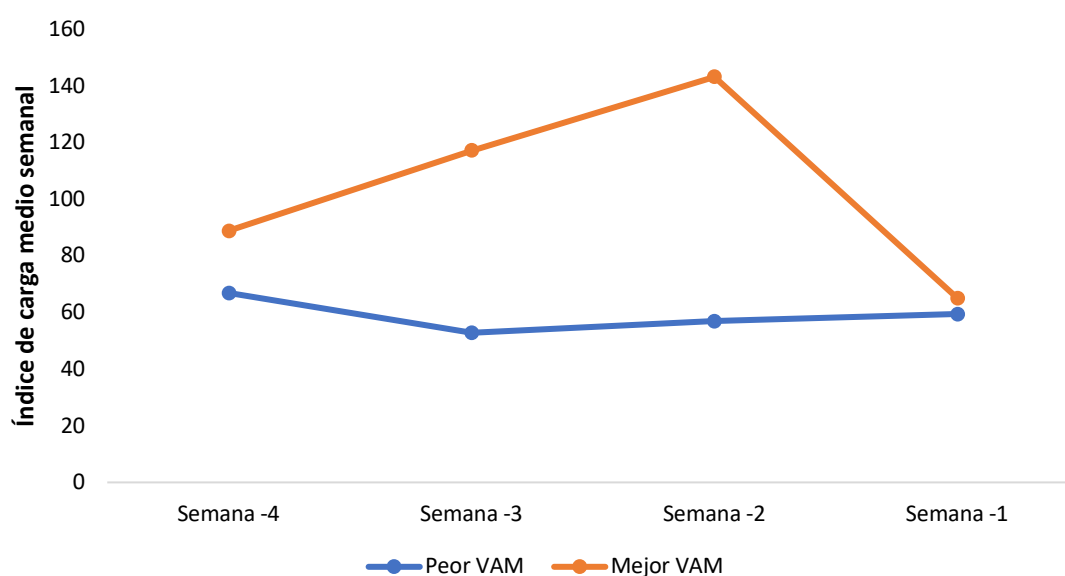


Figura 6.4: Evolución del IC medio semanal de las 4 semanas previas al mejor y peor resultado en el test de VAM y tiempo límite

Además, se analizó el porcentaje de pérdida de CMJ medio semanal de las 4 semanas previas al mejor y al peor test de VAM y tiempo límite (**tabla 6.17, figura 6.5**) y del mejor y peor test de 300 m y 20 m (**tabla 6.18, figura 6.6**). En este análisis, se observó que cuando se obtuvieron los mejores resultados en pruebas predominantemente aeróbicas, la pérdida de salto vertical por sesión medio semanal durante las 4 semanas previas fue menor en cada semana y en la media de las 4 semanas (0,1%) que cuando se

obtuvieron los peores resultados en dichas prueba (3,95%). Por el contrario, la pérdida de salto vertical medio semanal era mayor tanto en cada semana individualmente como en su conjunto (7,1%) cuando se obtenía el mejor resultado en pruebas predominantemente “anaeróbicas” (300 m y 20 m) y menor (0,2%) cuando se obtenían los peores resultados en dichos test.

Tabla 6.17: Evolución de la pérdida de CMJ medio semanal las 4 semanas previas al mejor y peor test de VAM y tiempo límite.

	Peor VAM/Tlim	Mejor VAM/Tlim
Semana	CMJpérdida (%)	CMJpérdida (%)
4	3,0	0
3	1,2	0,3
2	4,0	0,1
1	7,6	0

Abreviaciones: VAM: Velocidad aeróbica máxima; Tlim: Tiempo límite; CMJpérdida: % pérdida de salto medio semanal

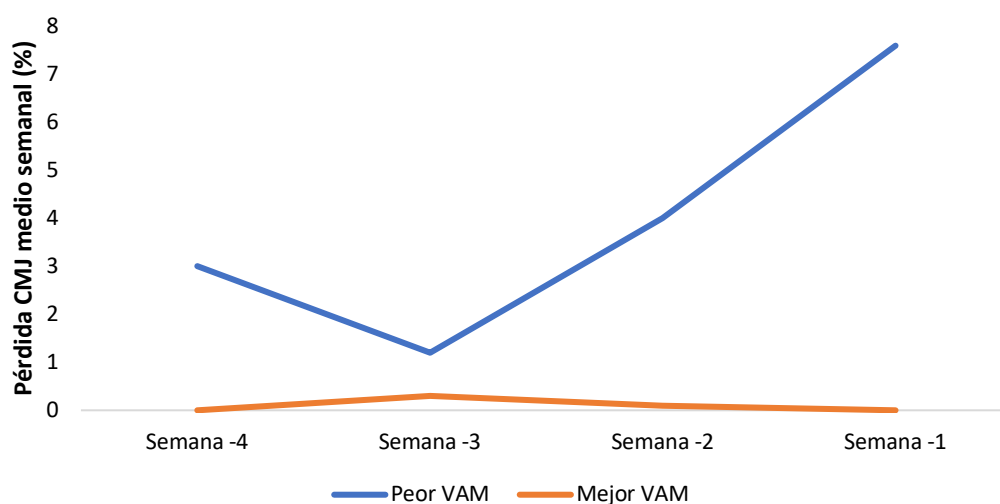


Figura 6.5: Evolución del % pérdida CMJ medio semanal de cada sesión de las 4 semanas previas al mejor y peor resultado en el test de VAM y tiempo límite

Tabla 6.18: Evolución de la pérdida de CMJ medio semanal las 4 semanas previas al mejor y peor test de 20 m y 300 m.

	Peor 20 m/300 m	Mejor 20 m/300 m
Semana	CMJpérdida (%)	CMJpérdida (%)
4	0	5,1
3	0	8
2	0	5,5
1	0,6	9,9

Abreviaciones: CMJpérdida: % pérdida de salto medio semanal

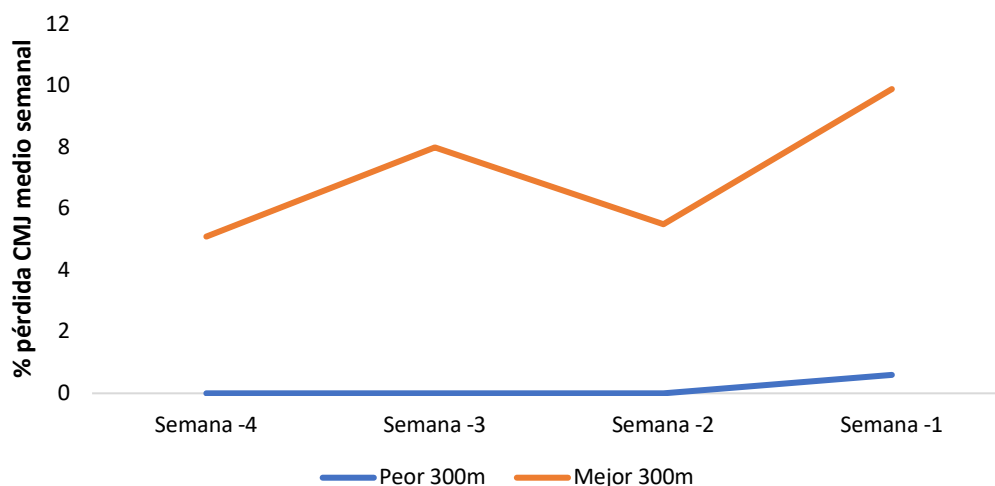


Figura 6.6: Evolución del porcentaje de pérdida de CMJ medio semanal de cada sesión de las 4 semanas previas al mejor y peor resultado en el test de 20 y 300 m

La evolución del CMJ medio semanal las 4 semanas previas al mejor y peor resultado en el test de 20 y 300 m aparecen representada en la **figura 6.7**. Se observa una tendencia a disminuir los valores de CMJ cuando se alcanzó el peor resultado y a aumentar cuando se alcanzó el mejor.

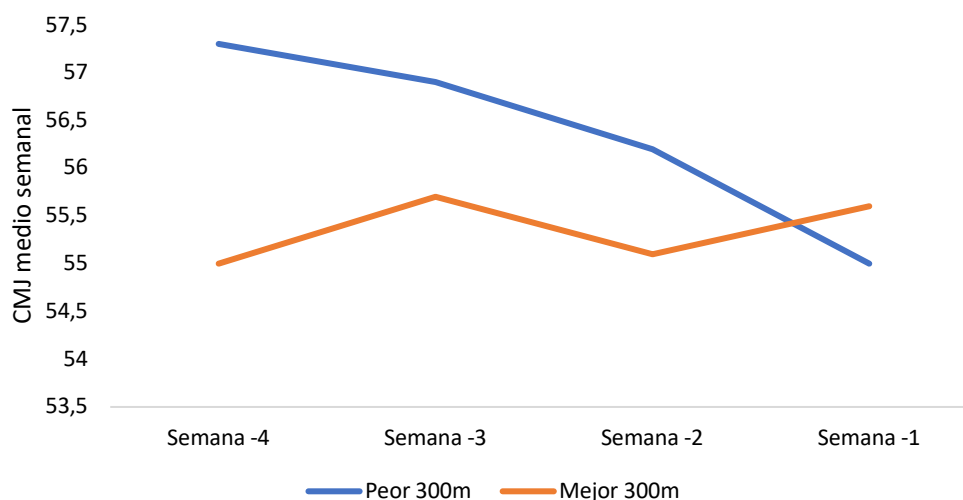


Figura 6.7: Evolución del CMJ medio semanal de cada sesión de las 4 semanas previas al mejor y peor resultado en el test de 20 y 300 m

Se analizó la evolución del IC las 4 semanas previas a la semana de mejor CMJ medio en cada una de las temporadas (**Figura 6.8**). En todos los casos, los valores de IC fueron menores en las semanas previas a la semana de mejor CMJ y fueron mayores en las semanas previas al peor CMJ medio semanal de la respectiva temporada.

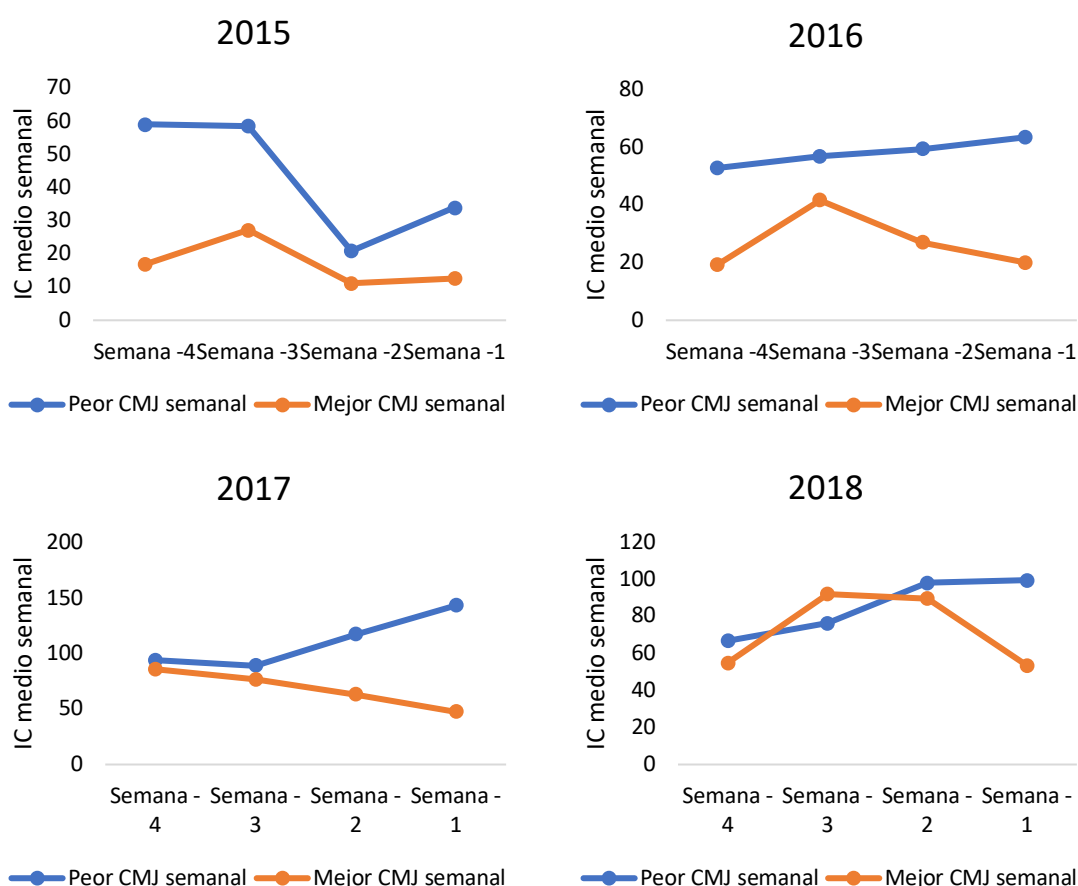


Figura 6.8: Evolución del IC medio semanal de las 4 semanas previas al mejor y peor CMJ medio semanal en cada una de las temporadas

Al analizar la evolución de la intensidad de entrenamiento las 4 semanas previas a la semana en la que se alcanzó el mejor y peor CMJ inicial medio en cada una de las temporadas (**Figura 6.9**), se encontró que en las semanas previas al mejor CMJ inicial medio semanal de la temporada el deportista entrenó siempre a mayor intensidad que cuando se alcanzó el peor CMJ medio semanal en cada una de las temporadas.

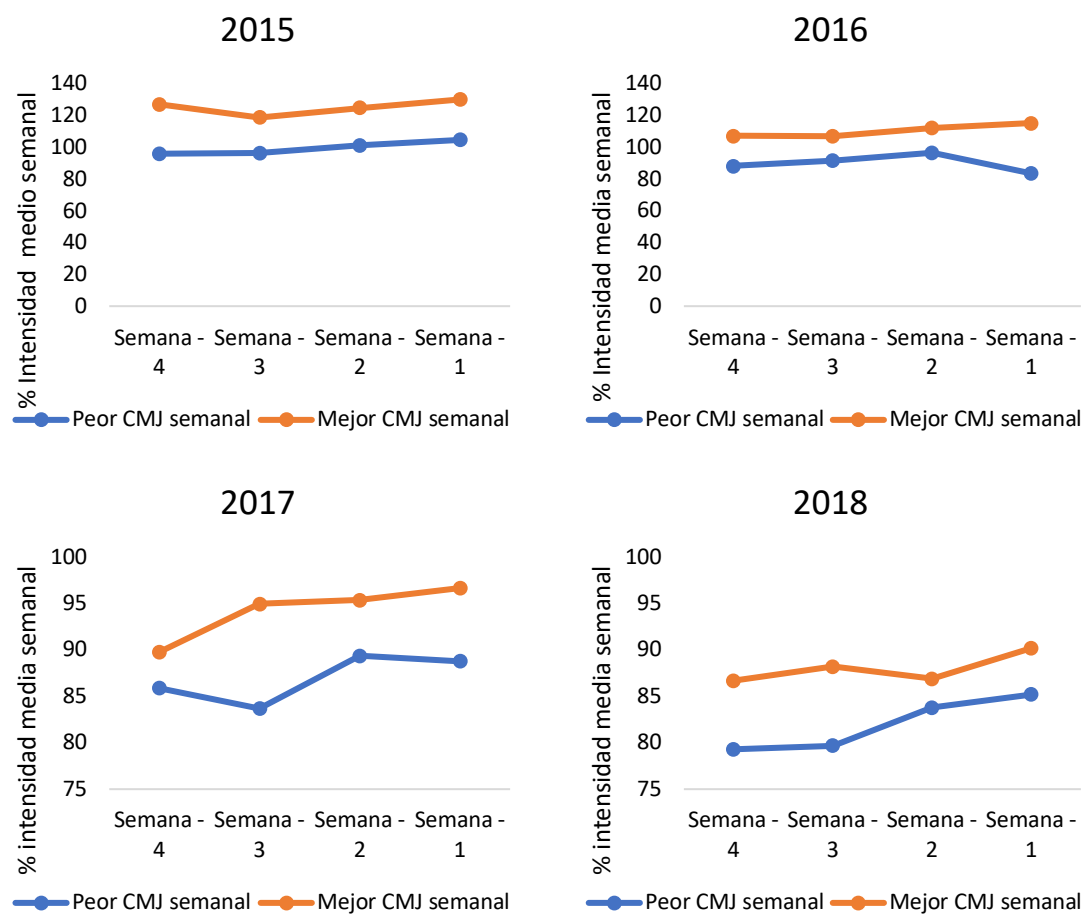


Figura 6.9: Evolución de la intensidad (%VAM) media semanal de las 4 semanas previas al mejor y peor CMJ medio semanal en cada una de las temporadas

Se estudió la evolución de la pérdida de salto pre-post sesión media semanal en las 4 semanas previas a la semana de mejor y peor CMJ inicial medio (**Figura 6.10**). En todas las temporadas, los valores de los porcentajes de pérdida de CMJ fueron mayores en las semanas previas a la semana de mejor CMJ y menores en las semanas previas al peor CMJ medio semanal de la respectiva temporada.

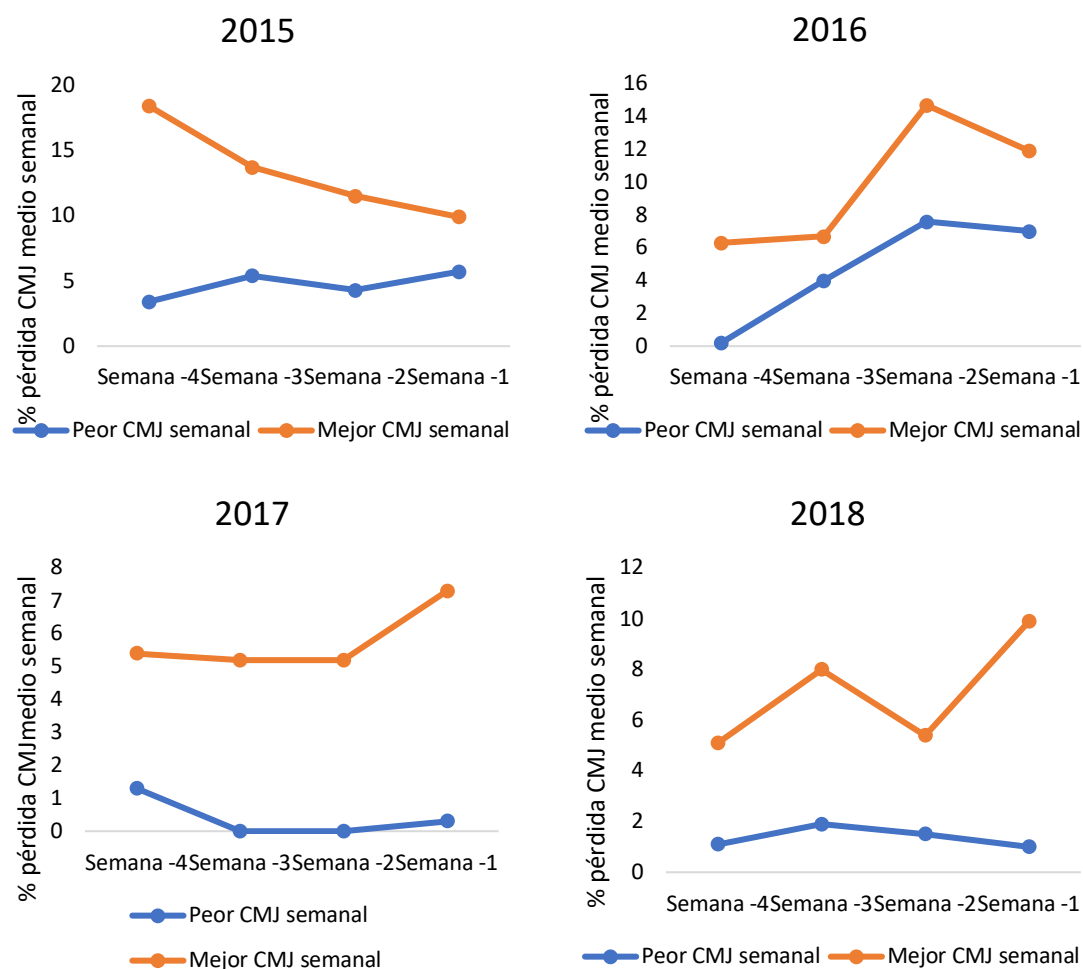


Figura 6.10: Evolución del porcentaje de pérdida de CMJ medio semanal de cada sesión de las 4 semanas previas al mejor y peor CMJ medio semanal

Discusión

7. DISCUSIÓN

Diferencias en el rendimiento entre distintas superficies

El objetivo del estudio preliminar fue analizar las diferencias en el rendimiento obtenido en dos pruebas realizadas en superficies distintas (tapiz con un 1% de pendiente y pista), con idéntico protocolo de velocidad, con deportistas altamente entrenados y con amplia experiencia tanto en pruebas de valoración en campo como en pruebas en laboratorio.

Los principales hallazgos de este estudio indican que existen diferencias significativas a favor del tapiz rodante en la velocidad ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) ($p < 0,001$) y en el tiempo (min) ($p < 0,001$) alcanzado con unas diferencias porcentuales medias de $8,1 \pm 2,3$ y de $13,3 \pm 3,35\%$, respectivamente. Estos resultados son semejantes, aunque ligeramente menores, a los encontrados en otros estudios donde las diferencias fueron de 12,8% y 17,9% para velocidad y tiempo (Cappa et al., 2014). Estas diferencias se obtuvieron pese a que no se encontraron diferencias significativas en la mayoría de las variables indicadoras de esfuerzo y fatiga como la FC media (ppm), concentración sanguínea de lactato ($\text{mmol}\cdot\text{l}^{-1}$) y pérdida de salto vertical pre-post esfuerzo (%). Estos resultados son similares a los encontrados por otros autores que no obtuvieron diferencias ni en los valores de consumo de oxígeno máximo ni en la concentración sanguínea de lactato cuando se realizaba un test en laboratorio y en pista (McMiken & Daniels, 1976; Meyer et al., 2003; Mooses et al., 2015). Sin embargo, estos mismos autores reportan diferencias significativas en la frecuencia cardíaca máxima alcanzada a favor del test en pista, lo cual difiere de nuestros resultados (Meyer et al., 2003). Nuestros datos también muestran diferencias significativas en la frecuencia cardíaca máxima, pero en este caso, siendo ligeramente mayores en la prueba en tapiz. Estas diferencias no se encontraron en el grupo de mujeres del mismo nivel deportivo con el que también se realizó el estudio, pero cuyos resultados no han sido presentados en esta tesis doctoral, dado que en este caso se trata de un deportista de sexo masculino (Marco-Contreras, Bachero-Mena, & González-Badillo, 2020). Tampoco hemos encontrado diferencias en la frecuencia cardíaca media durante toda la prueba. Las diferencias en la frecuencia cardíaca máxima encontradas en nuestro estudio podrían venir justificadas por la peor termorregulación que se produce en ambientes cerrados y sin flujo de aire (Riggs, Johnson, Konopka, & Kilgour, 1981; Williams & Kilgour, 1993).

Estudios pioneros en esta línea, centrados en variables fisiológicas como el VO_2max y el gasto energético, sí encontraron diferencias entre ambas superficies. El análisis de las causas se centró en la influencia de la resistencia del aire a la penetración durante la carrera a distintas velocidades (Pugh, 1970; van Ingen Schenau, 1980). El mayor coste energético encontrado cuando se corre en pista con el aire en calma se ha establecido en un rango de entre el 4 y el 7,5% para velocidades de pruebas de media distancia y entre el 7,8 y el 13% para velocidades de pruebas de sprint máximo (Davies, 1980; Pugh, 1971). Aunque en nuestro trabajo no se midió el gasto energético ni el VO_2max , estos resultados son coherentes con los encontrados en cuanto a las diferencias de velocidad y tiempo alcanzados, puesto que es razonable pensar que un mayor coste energético ante una misma intensidad de carrera nos debe llevar al agotamiento en menor tiempo. Además, estos mismos autores encontraron que el hecho de correr detrás de otro corredor podría reducir esta resistencia de penetración en hasta un 6,5% en las velocidades de pruebas de media distancia (Pugh, 1971). Por ese motivo, en el procedimiento de nuestro trabajo, cada corredor fue valorado de manera individual, evitando que los deportistas pudieran beneficiarse de correr en grupo, y con ello alterar los resultados. Es reseñable que estas diferencias indicadas en los estudios previos y que hemos considerado coherentes con las obtenidas en nuestros resultados, están conseguidas en condiciones distintas. Estos trabajos mencionados anteriormente analizaron las diferencias entre correr en pista y en tapiz sin añadirle a este último ninguna pendiente. Sin embargo, en un estudio de referencia posterior se propusieron estudiar qué pendiente podría añadirse a la carrera en tapiz para igualar o compensar este mayor gasto (Jones & Doust, 1996). Estos autores establecieron que un 1% era la pendiente que mejor reflejaba el coste energético de correr en pista frente a hacerlo en tapiz. Mismos resultados se encontraron cuando se analizaron las curvas de lactato en corredores en distintas superficies (Heck et al., 1985). Aunque los autores reflejaron que esta pendiente se ajustaba a esfuerzos de aproximadamente 5 minutos y a velocidades entre 2,92 y 5,0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (10,5 y 18 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$), la introducción del 1% de pendiente se extendió a multitud de protocolos de valoración de deportistas sin tener en cuenta que esta pendiente podría ser insuficiente si los atletas corren a mayores velocidades o durante más tiempo. Por ese motivo, y aunque los especialistas de 800 m son capaces de alcanzar mayores velocidades y las pruebas de evaluación tienen una duración superior a los 25 minutos, realizamos el test con 1% de pendiente. Por tanto, las amplias diferencias encontradas en nuestro estudio y descritas previamente, podrían venir en parte explicadas por incluir solo esa pendiente de corrección.

Sin embargo, estudios previos (Meyer et al., 2003; Peserico & Machado, 2014), han observado resultados diferentes a los de nuestro trabajo, encontrando mayores velocidades cuando el test se realizaba en pista. Pero estas discrepancias podrían venir explicadas por la diferencia en la duración del protocolo en el que los deportistas llegaban a la extenuación en 10-12 min (Meyer et al., 2003), respecto a los $27 \pm 3,1$ min de nuestro estudio. En otro estudio, el protocolo consistía en recorrer a la mayor velocidad posible durante un tiempo fijado en 60 min (Peserico & Machado, 2014). La metodología de este trabajo permitía la libre elección del ritmo de carrera por los corredores lo cual difiere de nuestra metodología y además hace que los resultados no puedan ser comparados entre sí, al ser dos esfuerzos de distinta intensidad relativa. Cabe destacar que estos mismos autores indican que se alcanzó mayor frecuencia cardíaca máxima en el test en pista, pero de nuevo es necesario señalar que los sujetos que corrieron en pista lo hicieron a mayor velocidad media. Por último, algunos autores han encontrado mejores economías de carrera en la pista (Mooses et al., 2015) respecto a un test en tapiz con un 1% de pendiente, lo cual podría llevar a permitir alcanzar mayor velocidad o aguantar mayor tiempo en la prueba. Estos datos, que de nuevo difieren de los nuestros, no se indican en el estudio y además el valor de economía de carrera se establece a una velocidad de $16 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, por lo que tampoco sería comparable a nuestro estudio, donde todos nuestros corredores superaron esa velocidad ampliamente, corriendo a superiores velocidades absolutas, pero todos a la misma velocidad relativa. Además, se ha observado que los mediofondistas suelen ser más económicos a mayores velocidades que la utilizada en el estudio citado (Daniels & Daniels, 1992).

Nuestros resultados no son comparables a los de otros estudios donde se analizaron las diferencias entre ambas superficies cuando se realizan esfuerzos de muy alta intensidad (sprints). Sin embargo, aunque nuestros deportistas no realizaron sprints, las velocidades finales alcanzadas en el test incremental por nuestro grupo de atletas ($21,9 \pm 1,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) son bastante superiores a las alcanzadas en la mayoría de estudios previamente indicados. Puesto que las intensidades finales absolutas son más altas, la resistencia a la penetración al aire se incrementa (Davies, 1980) y por tanto es razonable admitir que las diferencias pueden incrementarse a mayor velocidad. En esfuerzos de muy corta duración ($<10 \text{ s}$) y alta velocidad ($7,92 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $28,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) se han encontrado resultados coherentes con los de nuestro trabajo, alcanzando velocidades un 11,5% mayores a las alcanzadas en pista. Otros autores hallaron mayores velocidades en el tapiz al analizar carreras de 100 m a la

máxima intensidad (Morin & Sève, 2011) y en esfuerzos repetidos de 20 s (Nummela et al., 2007) que encontraron mayores velocidades en el tapiz. Los propios autores sugieren dificultades técnicas por falta de familiarización en la carrera a esas velocidades en tapiz y por la resistencia del tapiz a acelerar con cada zancada del deportista. Otros factores que podrían estar perjudicando las velocidades alcanzadas en tapiz, como la incomodidad de los deportistas sobre el tapiz al sentir mayor riesgo de caída a altas velocidades, así como el hecho de que al no tener que controlar el ritmo el deportista centre su atención en las sensaciones internas de esfuerzo también han sido indicadas en otros estudios (Miller et al., 2019). La experiencia de nuestros deportistas podría haber atenuado o eliminado la influencia de estos factores. En cualquier caso, a pesar de que no parece existir un consenso claro sobre estas diferencias, el objetivo de nuestro trabajo era poder trasladar la información obtenida en el deportista durante las valoraciones periódicas a su entrenamiento habitual en pista. Por tanto, nuestros resultados indican que, al trasladar los ritmos alcanzados en las pruebas de valoración de laboratorio, deberíamos tener en cuenta que estos pueden estar sobreestimados si los aplicamos directamente al entrenamiento real del deportista en campo. Además, y aunque ampliamente aceptado, nuestra investigación indica que el 1% de pendiente podría ser insuficiente para equiparar las diferencias entre superficies.

Efectos de la carga de entrenamiento sobre el salto vertical

El objetivo del estudio principal que compone esta tesis doctoral fue analizar la relación entre la carga de entrenamiento y la evolución del salto vertical como estimador del estado de condición física en un atleta de alto nivel especialista en 800 m. El periodo de análisis comprende cuatro temporadas completas de atletismo, en la que se analizaron unas 40 semanas de entrenamiento por temporada aproximadamente, con alguna temporada con menor número debido a lesiones del deportista. A modo ilustrativo se ha incluido una tabla resumen de las variables medidas en la temporada 2015 (**tablas 6.2 y 6.3**). En el resto de las temporadas se añadió la VSCF de cada sesión de entrenamiento. Además, en estas temporadas se incluyó diversos test de valoración de la condición física sobre indicadores de rendimiento relacionados con la prueba del deportista.

El índice de carga establecido en este trabajo, como se ha descrito en la metodología, es un valor que pretende servir de indicador objetivo de la magnitud de los distintos

estímulos aplicados por el deportista. Al analizar la relación del IC con sus dos componentes (intensidad y volumen), observamos que esta es negativa con la intensidad y positiva con el volumen con valores próximos a 1 en este último ($r = 0,989-0,997$) (**tabla 5.2**). Estos datos indican que si bien ambos componentes son determinantes del IC, su relación con el IC es de distinto signo, y además el volumen presenta un mayor peso en los valores de dicho índice. Por lo tanto, un IC alto se caracteriza por un volumen de entrenamiento alto que irá acompañado de una intensidad baja, y un valor de IC bajo se compone por un volumen de entrenamiento bajo pero una intensidad elevada.

Dada la necesidad de obtener una explicación de los rendimientos obtenidos por los deportistas, debemos buscar algunos procedimientos de cuantificación de la carga de entrenamiento que nos permita analizar las relaciones entre carga y rendimiento. Los resultados de nuestro estudio indican que existe una relación negativa significativa entre el IC de una sesión y la pérdida de CMJ pre-post de la misma. Estas relaciones se dieron en todas las temporadas analizadas con valores semejantes (**tabla 6.4**) y también se observaron cuando se analizaron por separado los distintos ciclos de la temporada (pista cubierta o aire libre) (**tabla 6.5 y 6.6**). Aunque aparentemente contradictorio, tal como hemos mencionado anteriormente, las sesiones de mayor IC corresponden con las de mayor volumen y menor intensidad. Dado que la pérdida de salto pre-post esfuerzo es un indicador claro de fatiga, en este análisis se confirma, y de manera muy directa y próxima en el tiempo, que una mayor pérdida de salto en la sesión es consecuencia de sesiones con IC menores, y por tanto, de mayor intensidad.

Estos resultados son coherentes con estudios previos en los que se ha analizado la pérdida de salto en la sesión en distintos tipos de esfuerzo en entrenamiento de fuerza (González-Badillo et al., 2016; Pareja-Blanco et al., 2017, 2019; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011b; Watkins et al., 2017). La pérdida de velocidad en las series de sentadilla, como indicador claro y directo de la fatiga generada tras 3 series de sentadilla con cargas y número de repeticiones por serie diferentes, mostró una alta relación ($r = 0,93$) con la pérdida de CMJ pre-post esfuerzo. A su vez, la pérdida de CMJ pre-post esfuerzo presentó una alta correlación con indicadores del estrés metabólico como lactato ($p = 0,95$) y una relación exponencial ($R^2 = 0,85$) con la concentración de amonio (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011b). Estos autores concluyeron que la pérdida de CMJ en la sesión puede ser utilizada como un indicador fiable de la fatiga. Resultados parecidos se

obtuvieron cuando se analizó la pérdida de CMJ pre-post sesión en entrenamiento de carrera (Bachero-Mena & González-Badillo, 2021; Gorostiaga et al., 2010; Jimenez-Reyes et al., 2016; Jiménez-Reyes et al., 2019; Lacour, Barth, et al., 1990; Paavolainen, Häkkinen, Nummela, & Rusko, 1994). Las sesiones de más alta intensidad han mostrado elevadas pérdidas de salto vertical medido inmediatamente después de cada esfuerzo. En un estudio realizado con nueve atletas velocistas, alguno de ellos de alto nivel, se observó una alta relación ($r > 0,9$) entre la pérdida de velocidad en la serie (fatiga) y la pérdida de salto de CMJ al final de la sesión cuando realizaban repeticiones de 40 y 60 m a la máxima velocidad posible hasta perder una 3% de la velocidad máxima. También se observó que la pérdida de salto presentó una alta correlación con la concentración de lactato ($r = 0,93-0,99$) y amonio ($r = 0,94-0,99$) al final de cada sesión (Jimenez-Reyes et al., 2016; Jiménez-Reyes et al., 2019). Valores similares de correlación se obtuvieron cuando se analizó la pérdida de salto vertical y la concentración de lactato ($r = 0,87$) y amonio ($r = 0,91$) en velocistas al finalizar una competición de 200 y 400m (Jiménez-Reyes, Molina-Reina, González-Hernández, & González-Badillo, 2013). Resultados semejantes se encontraron cuando se comparó la pérdida de salto de CMJ con los mismos indicadores metabólicos de fatiga en corredores de 400 m que realizaban distintas sesiones de alta intensidad propias de su prueba (Gorostiaga et al., 2010). Además, la relación entre la pérdida de salto y la concentración de lactato también se da en esfuerzos realizados en sesiones específicas de corredores de 800 m cuando realizan repeticiones de 200 m a la máxima intensidad ($r = -0,83$) (Bachero-Mena & González-Badillo, 2021). Aunque en nuestro trabajo no se ha medido la concentración de lactato en las sesiones diarias de entrenamiento, los resultados de todos estos estudios refuerzan la propuesta de que la utilización del salto del CMJ puede ser útil para el control de la carga de entrenamiento y el grado de fatiga y estrés metabólico generados.

Dado que el grado de pérdida de CMJ en la sesión podría estar condicionado por el valor de salto previo al inicio de la sesión, se controló el CMJ inicial a través de una correlación parcial, y los valores de las correlaciones entre el IC y la pérdida en la sesión en todas las temporadas se mantuvieron en valores similares en unos casos y en otros aumentó (**tabla 6.4**), lo que significa un mantenimiento de la varianza explicada, y, por tanto, que la relación entre el IC y la pérdida de salto es independiente de terceras variables. Por tanto, estos resultados indican que la pérdida de salto en la sesión depende fundamentalmente de la carga de entrenamiento, y no del valor inicial del salto previo a la sesión. De hecho,

al analizar la pérdida de salto vertical en los diferentes tests de 300 m, como prueba exponente de la máxima implicación del sistema anaeróbico, el deportista obtuvo valores de pérdida muy parecidos en todos ellos, siendo exactamente el mismo en 3 de los casos, a pesar de comenzar con valores iniciales de salto diferente (**tabla 6.14**). Estos resultados no van en contra de los obtenidos por otro estudio (Gorostiaga et al., 2010), cuando observaron que sujetos con mayor capacidad de salto inicial, tendían a tener mayores pérdidas de salto vertical en la sesión comparado con aquellos sujetos de menor capacidad de salto inicial, ya que estas tendencias pueden deberse a las distintas características de los sujetos, mayor o menor porcentaje de fibras rápidas, mayor o menor potencia y capacidad anaeróbica máxima y a que no todos los sujetos alcanzan el mismo grado de fatiga para un mismo número de series a la misma intensidad relativa. Esta circunstancia no se da en nuestro caso ya que se trata de múltiples mediciones para un mismo sujeto. Nuestros resultados sugieren que la pérdida máxima tolerada por el deportista estaría en torno al 20-24%.

Sin embargo, en algunos estudios previos en los que se ha analizado la pérdida de salto vertical ante esfuerzos prolongados, algunos de ellos hasta el agotamiento, se ha encontrado una mayor capacidad de salto al finalizar los esfuerzos (Boullosa & Tuimil, 2009; Boullosa, Tuimil, Alegre, Iglesias, & Lusquiños, 2011; García-Pinillos, Soto-Hermoso, & Latorre-Román, 2015). Estos resultados opuestos a los encontrados en nuestro trabajo podrían venir explicados por un calentamiento insuficiente previo al salto inicial que subestimara la capacidad real del deportista, ya que el calentamiento consistió en sólo 10 minutos de carrera al 60% de la FC máxima y 2 o 3 saltos con contramovimiento, lo que podría no ser suficiente para acciones de gran producción de fuerza en la unidad de tiempo como el CMJ. En la misma línea, pero en deportes de equipo, en un estudio realizado en jugadores de rugby no se encontraron diferencias en el rendimiento del salto realizado antes y después de distintas sesiones específicas del deporte (Malone et al., 2015). Sin embargo, estos resultados podrían deberse, de nuevo, a cuestiones metodológicas como un calentamiento insuficiente y/o un tiempo excesivo entre la finalización de la sesión y la medición del salto. En este trabajo hubo un intervalo de 5 minutos entre la finalización del entrenamiento y la medición del salto. Este tiempo podría ser suficiente para recuperar los niveles iniciales de salto, especialmente si se emplearon sesiones que no generaran una fatiga elevada, lo cual podría servir incluso como calentamiento/potenciador del salto final. Esto podría venir justificado además, tal

como indican los autores, porque la intervención se realizó en los días previos a una competición, donde se busca mantener la forma física y los niveles de carga no fueron altos. Además, en este tipo de deportes el entrenamiento implica gran número de instrucciones técnicas, las cuáles interrumpen los esfuerzos y reducen la intensidad global del entrenamiento. Cuando estas cuestiones son controladas en deportes de equipo, los resultados fueron similares a los obtenidos en nuestro trabajo (Morcillo et al., 2015). El deportista objeto de esta tesis doctoral realizó 10 pruebas incrementales hasta el agotamiento durante los 4 años de seguimiento. En todas las pruebas, con características similares a las de estudios citados, el sujeto sufrió una pérdida de salto vertical pre-post esfuerzo (**tabla 6.12**). Además, al analizar la relación entre el rendimiento en el test y la pérdida de salto vertical, se encontró una relación positiva significativa entre el tiempo realizado y la pérdida de salto pre-post test ($r = 0,86$, $p < 0,001$) y entre la velocidad alcanzada y la pérdida de salto pre-post test ($r = 0,93$, $p < 0,001$). Al controlar, a través de correlaciones parciales, el efecto del CMJ inicial sobre estas relaciones, se mantuvieron valores similares significativos ($r = 0,9$, $p < 0,001$; y $r = 0,94$, $p < 0,01$) para el tiempo y la velocidad, respectivamente. Por tanto, estos resultados indican que la pérdida de salto vertical ante un esfuerzo incremental hasta el agotamiento es inevitable en un deportista entrenado en esta especialidad y que, además, tiende a aumentar conforme el rendimiento en la prueba aumenta, es decir, se alcanzan velocidades absolutas mayores. Por estos motivos, las características del deporte y el tipo de esfuerzo realizado, así como la metodología empleada, son aspectos que deben tenerse en cuenta al comparar resultados.

No obstante, la principal aportación de nuestro trabajo en este aspecto ha sido estudiar la respuesta del salto vertical ante distintos valores de IC, o lo que es lo mismo, ante distintas combinaciones de intensidad y volumen de entrenamiento. No hemos encontrado estudios previos que hayan estudiado la relación entre la pérdida de salto y distintos valores de carga medido en los mismos deportistas durante el ejercicio de carrera. Sin embargo, en estudios previamente citados (Bachero-Mena & González-Badillo, 2021; Jimenez-Reyes et al., 2016; Pedro Jiménez-Reyes et al., 2019), se midió la pérdida de salto vertical tras cada repetición del entrenamiento, por lo que podríamos considerar cada repetición como una unidad de carga independiente que mantiene una relación con la pérdida de salto. En estudios de entrenamiento de fuerza (González-Badillo et al., 2016; Pareja-Blanco et al., 2017, 2019) donde se controló la variable intensidad y se utilizaron distintas

combinaciones de volumen mostraron pérdidas de salto vertical dependiente de la carga aplicada que son coherentes con los resultados obtenidos en nuestro trabajo. El hecho de que estos estudios se realizasen en un ejercicio distinto a la carrera no deja de confirmar la alta relación entre el grado de carga y la pérdida de salto vertical post esfuerzo.

Por otro parte, hemos encontrado una relación negativa significativa entre la carga de entrenamiento y el salto vertical, en este caso como indicador del estado de recuperación a las 24 horas, en todas las temporadas analizadas ($r=$ entre -0,31 y -0,60) (**tabla 6.7**). Esta relación, como se comentaba en el apartado de resultados, se daba cuando se tomaban en conjunto todos los valores de IC de todas las sesiones. Esto era esperable a tenor de la relación encontrada y mencionada anteriormente, entre el IC y la pérdida de salto pre-post sesión. Además, al analizar la relación entre el IC medio semanal y el CMJ medio semanal encontramos la misma relación negativa significativa (**tabla 6.8, 6.9 y 6.10**), lo que de nuevo pone de manifiesto que el CMJ es sensible a los cambios en los valores de carga del deportista, en este caso, en un ciclo semanal. Cuando se analizó el IC medio semanal con el CMJ inicial de la primera sesión de la semana siguiente (**tabla 6.8, 6.9 y 6.10**), es decir, con al menos 48 horas de separación, se observó la misma tendencia, manteniéndose la relación negativa significativa con incluso valores ligeramente superiores. De nuevo, parece que el CMJ podría ser sensible a la fatiga generada por la carga de entrenamiento y al efecto acumulativo de esta durante varios días incluso 48 horas después del último esfuerzo. Estos resultados son coherentes con los de otros estudios en los que se ha analizado el efecto de distintas sesiones de entrenamiento de fuerza con grados de esfuerzos distintos sobre indicadores mecánicos de fatiga como el valor de CMJ a las 24 y 48 h post entrenamiento (González-Badillo et al., 2016; Pareja-Blanco et al., 2017, 2019). Cuando se midió el efecto de dos protocolos con 3 series en sentadilla completa, uno hasta el fallo muscular (carácter del esfuerzo 8 sobre 8) y otro con la mitad de las repeticiones posibles (carácter del esfuerzo 4 sobre 8) sobre el salto vertical medido a las 24 y 48 h, se encontró una reducción en la capacidad de salto importante cuando realizaron el esfuerzo hasta el fallo a las 24 h ($-6,1 \pm 5,9\%$) y a las 48 h ($-4,4 \pm 6,1\%$) (González-Badillo et al., 2016). Cuando el esfuerzo realizado fue con la mitad de las repeticiones posibles, los valores de salto previos al entrenamiento se recuperaron prácticamente a las 6 horas e incluso mostraron una tendencia a aumentar a las 48 horas. Resultados con la misma tendencia se encontraron en otro estudio donde se midió el mismo grado de esfuerzo pero con la carga de 12 repeticiones en sentadilla

(aproximadamente 70% de la repetición máxima) (Pareja-Blanco et al., 2017). En otro estudio realizado nuevamente sobre el ejercicio de sentadilla completa se analizaron dos cargas (60-80% RM) con dos grados de fatiga representados por la pérdida de velocidad en la serie respecto a la primera repetición (20-40% pérdida de velocidad) (Pareja-Blanco et al., 2019). El valor de salto se redujo, como era esperable y se ha mencionado anteriormente, inmediatamente tras cada uno de los esfuerzos. Además, permaneció reducido a las 24 h para todas las combinaciones de esfuerzo descritas. Sin embargo, el principal hallazgo de este estudio es que los protocolos que implicaban mayor intensidad (y menor volumen) obtuvieron una recuperación más rápida que aquellos protocolos con una intensidad menor pero mayor volumen entendido como número de repeticiones realizadas. En estos esfuerzos de más alta intensidad y menor volumen, el salto estaba totalmente recuperado a las 48 h mientras que en el grupo de menor intensidad no. Todos estos estudios nos muestran que el CMJ puede ser un buen indicador del estado de recuperación neuromuscular del deportista. En un estudio relacionado, se analizó la capacidad de diferentes test para detectar la fatiga neuromuscular tras un esfuerzo de alta intensidad (sprints) (Gathercole et al., 2015). El CMJ mostró ser el test con mayor validez y sensibilidad para detectar la fatiga neuromuscular inmediata, así como tras 24 y 72 horas tras la realización del esfuerzo. No hemos encontrado estudios que hayan analizado la relación entre la carga de entrenamiento en el ejercicio de carrera e indicadores mecánicos de fatiga como el salto vertical en las horas y días posteriores a esfuerzos de distintas características.

Al analizar con detalle la distribución de los puntos representativos de los pares de datos en la relación entre la carga de entrenamiento y el salto vertical a las 24 horas, encontramos una tendencia curvilínea (**Figura 6.1**) ya que cuando las cargas son muy pequeñas se observa una tendencia al aumento del salto hasta valores de IC aproximadamente de 8 y que con cargas superiores, se observa la misma tendencia negativa pero con valores superiores ($r=$ entre -0,4 y -0,689), que con todos los datos en su conjunto ($r=$ entre -0,31 y -0,60) (**figura 6.2, tabla 6.7**). Esto parece indicar que existe un límite a partir del cual el volumen de entrenamiento no permite un efecto positivo sobre acciones de alta velocidad como el CMJ y que el grado de fatiga generado por sesiones con un bajo IC (<8), lo cual supone una alta intensidad y bajo volumen de entrenamiento, tiende a aumentar la capacidad de salto en la siguiente sesión consecutiva (24-48 h después) a pesar de que este tipo de sesiones producen una mayor pérdida dentro

de la sesión. Estos resultados se encontraron en todas las temporadas con altos valores de correlaciones dependiendo del número y carga de las sesiones realizadas, salvo en la temporada 2016 donde no hubo sesiones con valores en torno a 8. En línea con este resultado, un estudio encontró resultados parecidos al comparar dos intensidades de entrenamiento de fuerza con distinto grado de esfuerzo (20-40% pérdida de velocidad en la serie) observando una tendencia a una más rápida recuperación de los valores de salto en el entrenamiento de mayor intensidad. Esto podría venir explicado porque a mayores intensidades el volumen de entrenamiento es menor para alcanzar el mismo grado de pérdida de velocidad y eso podría suponer una más rápida recuperación posterior (Pareja-Blanco et al., 2019).

Se analizó la relación entre el CMJ inicial de la sesión y un indicador subjetivo propio de la condición física (VSCF) (**tabla 6.11**). Se encontró una relación positiva significativa en todas las temporadas, en alguna de ellas con un valor de relación considerable ($r=0,502$; $p<0,001$). Esta relación fue incluso mayor ($r=0,86$; $p<0,001$) cuando se estudió la relación del VSCF medio semanal con el CMJpre medio semanal en la temporada 2016. Además, las semanas en las que el sujeto tuvo una más alta VSCF tuvieron lugar aproximadamente a partir de la semana 12 de entrenamiento. Estos momentos coinciden además con datos de CMJ superiores a la media de la temporada respectiva. Estos resultados sugieren que el tiempo mínimo necesario para alcanzar alto rendimiento durante una sesión de entrenamiento para este deportista, en función de la carga de entrenamiento aplicada, es aproximadamente de 12 semanas. No hemos encontrado estudios previos que hayan hecho este análisis. Según nuestros resultados el CMJ podría ser, no sólo un buen indicador de la fatiga y la recuperación post esfuerzo, sino también un buen indicador del estado físico del deportista previo a la sesión de entrenamiento o competición.

Descripción de la evolución del rendimiento

La evolución de los valores de los indicadores de fuerza, velocidad y potencia aeróbica y anaeróbica vienen descritos en los resultados (**tablas 6.12-6.15**). El deportista mostró una tendencia a mejorar su rendimiento en todas las pruebas a lo largo de cada una de las temporadas de manera independiente. Al analizar la relación entre los distintos indicadores se encontró una relación positiva significativa entre el rendimiento en el test de fuerza en sentadilla (con la carga de 70 kg como referencia) y el rendimiento en los test de velocidad aeróbica máxima ($r= 0,87$, $p< 0,01$) y en el tiempo límite ($r= 0,66$, $p< 0,05$). Estos resultados coinciden con los hallados en el estudio complementario que ha sido ya citado en este documento sobre las diferencias en rendimiento entre un test incremental máximo realizado en tapiz y en pista, que ha dado lugar a una comunicación en formato póster en un congreso internacional, y cuyos resultados están en proceso de publicación. En este estudio, además de analizar las diferencias entre el tapiz y la pista, se realizó un test de fuerza para analizar las posibles diferencias entre rendimientos. Nuestros resultados mostraron una relación positiva significativa entre la fuerza en el ejercicio de sentadilla y el tiempo en el test ($r= 0,72$, $p< 0,05$) y la velocidad alcanzada ($r= 0,74$, $p< 0,05$). Esos resultados sugieren que los niveles de fuerza podrían explicar parte del rendimiento en una prueba de resistencia como un test de VAM o tiempo límite. Coincidente con nuestros resultados, hemos encontrado estudios que analizaron el efecto del entrenamiento de fuerza sobre el rendimiento en pruebas de resistencia (Aagaard & Andersen, 2010; Paavolainen, Häkkinen, Hämmäläinen, Nummela, & Rusko, 1999; B R Rønnestad & Mujika, 2014; Støren, Helgerud, Støa, & Hoff, 2008; Taipale et al., 2010). En esta línea, y relacionado con nuestros resultados, se encontró una mejora en el tiempo alcanzado en un test de VAM en corredores bien entrenados en resistencia tras 8 semanas de entrenamiento con altas cargas realizadas hasta el fallo (Støren et al., 2008). Los sujetos, además, mejoraron su mejor tiempo en 5 km. En otro estudio (Paavolainen et al., 1999), deportistas bien entrenados en resistencia llevaron a cabo un entrenamiento de fuerza, descrito como de “fuerza explosiva”, de 9 semanas consistente en saltos pliométricos y ejercicios generales de fuerza en piernas con cargas bajas y altas velocidades de ejecución, además del entrenamiento habitual en corredores. Los deportistas mejoraron su rendimiento en una prueba de 5 km pese a no encontrar cambios en el $VO_2\text{max}$. Además, el rendimiento en la prueba de 5 km presentó una correlación positiva significativa con el sprint de 20 m, un test de saltos y la potencia anaeróbica. Los

autores sugirieron que el rendimiento en la prueba puede estar relacionado con aspectos de potencia muscular y economía de carrera. Esta relación entre los niveles de fuerza y la economía de carrera también ha sido descrita en otros estudios (Balsalobre-Fernández, Santos-Concejero, & Grivas, 2016; Barnes & Kilding, 2015; Beattie, Kenny, Lyons, & Carson, 2014) y recientemente ha mostrado ser junto con el VO_2max , un predictor del rendimiento en resistencia (Lanferdini, Silva, Machado, Fischer, & Peyré-Tartaruga, 2020).

En un estudio realizado con corredores de 800 m se encontró un aumento significativo de los valores de fuerza (CMJ, sentadilla) y velocidad (200 m) coincidente con un aumento significativo del rendimiento en la prueba de 800 m a lo largo de una temporada (Bachero-Mena, Pareja-Blanco, & González-Badillo, 2017). Aunque en la presente tesis doctoral no hemos analizado los rendimientos en la prueba de competición del deportista, la tendencia en las pruebas de carrera fue similar, pues en nuestro trabajo se encontró una relación negativa significativa entre la velocidad máxima en el ejercicio de saltos con cargas y el parcial de 0-100 m en el test de 300 m ($r = -0,95$, $p < 0,05$). Estos resultados sugieren que los valores de fuerza representados por este ejercicio podrían estar relacionado con la capacidad de acelerar en los primeros metros de un test de intensidad máxima como el sprint (Comfort, Bullock, & Pearson, 2012; Seitz, Reyes, Tran, Saez de Villarreal, & Haff, 2014). En un estudio previo también se encontró una relación elevada en el rendimiento de la prueba de 800 m y la capacidad de salto ($r = 0,83$) (Hudgins et al., 2013). Precisamente, la máxima potencia generada en el salto con carga mostró una relación alta con la velocidad en carreras de 10, 30 y 50 metros ($r = 0,72$, $p < 0,01$) (Loturco, D'Angelo, et al., 2015) y con el tiempo en 100 metros ($r = -0,82$; $p < 0,01$) (Loturco, Pereira, et al., 2015), coincidente con nuestros resultados. Aunque el rendimiento en pruebas de resistencia se ha asociado a mejoras en la economía de carrera tal como se ha mencionado previamente, en pruebas como el 800 m y en pruebas de más corta duración como el sprint, las mejoras de fuerza y rendimiento podrían venir explicadas por un aumento de la capacidad de generar fuerza por unidad de tiempo provocadas por una mejora en la función neuromuscular y/o al aumento de fibras tipo IIA (Aagaard & Andersen, 2010).

En desacuerdo a nuestros resultados, en un estudio no se encontraron diferencias en los niveles de fuerza de deportistas de medio fondo de alto nivel durante una temporada

(Balsalobre-Fernández, Tejero-González, & Del Campo-Vecino, 2015). Sin embargo, el entrenamiento de fuerza de estos deportistas estaba caracterizado por múltiples ejercicios con un alto número de repeticiones y carácter del esfuerzo máximo o casi máximo (15-20 RM), por lo que las ganancias de fuerza podrían haberse visto atenuadas por una alta fatiga en cada serie de esfuerzo (González-Badillo et al., 2016; Izquierdo-Gabarren et al., 2010; Pareja-Blanco et al., 2017). Además, los deportistas realizaban de 7 a 10 sesiones específicas de resistencia, por lo cual, como ha sido descrito, las ganancias de fuerza pueden venir atenuadas al combinarse con sesiones de resistencia por el efecto de la “interferencia” (García-Pallarés & Izquierdo, 2011; Bent R Rønnestad, Hansen, & Raastad, 2012; Taipale, Mikkola, Vesterinen, Nummela, & Häkkinen, 2013). Además, la mayoría de los deportistas eran de 1500 m y pruebas de superiores distancias, por lo que las características del entrenamiento y las necesidades de fuerza pueden ser distintas.

Se registró la evolución del IC previo a los mejores rendimientos alcanzados en las distintas pruebas. Nuestro estudio muestra una tendencia a tener mayores valores medios semanales de IC las 4 semanas previas al mejor resultado en el test de VAM y tiempo límite (**tabla 6.16, figura 6.4**). Además, al analizar la pérdida de salto vertical media semanal de las 4 semanas previas, observamos que las pérdidas fueron menores cuando se alcanzó el mejor rendimiento en estas pruebas indicadoras de potencia aeróbica (**tabla 6.17, figura 6.5**). Sin embargo, al analizar la evolución de la pérdida de salto vertical las 4 semanas previas al mejor y peor resultado de 20 y 300 m, pruebas dependientes en gran medida de la potencia anaeróbica, observamos la tendencia contraria a la comentada con los test de resistencia aeróbica, pues los valores de pérdida fueron mayores cuando se alcanzó el mejor resultado. Aunque aparentemente contradictorio, los resultados son una muestra del principio de especificidad, puesto que para alcanzar mejor rendimiento en pruebas aeróbicas parece ser necesario un entrenamiento caracterizado por mayor volumen (mayor IC) y, por consiguiente, menor pérdida de salto vertical en la sesión. Por el contrario, para obtener el mejor rendimiento en pruebas de potencia anaeróbica, el deportista parece necesitar entrenamientos de mayor intensidad (menor IC), que provocan mayores pérdidas de salto. Esto pone de manifiesto la dificultad extrema que supone el entrenamiento de estas modalidades deportivas donde se deben combinar las distintas variables de entrenamiento en deportistas cuyos factores determinantes del rendimiento están compuestos por una mezcla de esfuerzos de tipo aeróbico y anaeróbico (Billat et al., 2009; Hill, 1999; Parmar et al., 2021). En corredores de media distancia se encontró

que los sujetos realizaban menos carga de entrenamiento, medida mediante el método “Sesión-RPE”, en la semana previa al mejor resultado de la temporada en competición (Balsalobre-Fernández et al., 2014). Sin embargo, aunque coincide parcialmente con nuestros resultados, este hecho podría atribuirse al efecto agudo del “*tapering*” previo a una competición (Bosquet, Montpetit, Arvisais, & Mujika, 2007; I Mujika, 1998), ya que no aborda la evolución de esta carga y las características (volumen e intensidad) de entrenamiento en función del tipo de prueba de rendimiento. No hemos encontrado estudios que hayan hecho este análisis presentado en esta tesis doctoral.

Al analizar la evolución del salto vertical medio semanal, las 4 semanas previas al mejor y peor rendimiento del test de VAM, al mejor y peor test de fuerza y test de 20 y 300 m, nuestros resultados muestran una tendencia a incrementar los valores de salto a lo largo de las 4 semanas cuando se alcanza el mejor rendimiento y a disminuirlos cuando se obtiene el peor resultado (**figura 6.7**). Si consideramos el CMJ como un indicador del estado físico del deportista, estos resultados son coherentes con los mencionados previamente en nuestro trabajo. Además, resultados muy similares se obtuvieron en un estudio pionero (Jiménez-Reyes & González-Badillo, 2011b), donde los autores comprobaron en atletas de velocidad y salto que cuando estos obtenían su mejor rendimiento en competición, el CMJ aumentaba progresivamente desde la 4ª semana hasta la semana de competición. Esto sin embargo no ocurrió cuando el resultado en competición era el peor. De nuevo, al analizar la evolución del CMJ en corredores de 800 m de alto nivel (Bachero-Mena, Pareja-Blanco, & González-Badillo, 2017), los deportistas fueron mejorando sus valores de CMJ conforme aumentaba el rendimiento en competición, obteniendo los mejores valores de CMJ de toda la temporada cuando se alcanzó el mejor tiempo en competición. Relacionado con estos hallazgos, los valores de CMJ en la semana donde el deportista obtenía el mejor resultado en pruebas de medio-fondo (1500 - 3000 m) eran mayores que la media de la temporada, mientras que se mantenía en valores medio en el peor resultado de la temporada (Balsalobre-Fernández et al., 2014). Esta relación objetiva entre el valor de CMJ y el rendimiento coincide con la relación positiva significativa entre el CMJ y la VSCF, en este caso, como indicador subjetivo de rendimiento y que ha sido citado previamente.

Cuando se analizó la evolución de la carga de entrenamiento media semanal, la intensidad media semanal y la pérdida de salto media semanal durante las semanas previas al mejor y peor resultado de CMJ en cada temporada, observamos la misma tendencia descrita hasta ahora (**figuras 6.8, 6.9 y 6.10**). Se obtuvieron valores de IC superiores cuando se manifestó la semana con el peor valor medio de salto y valores de IC inferiores cuando se alcanzó la semana de mayores valores medios. A tenor de la relación inversa entre el IC y la intensidad, se encontró una tendencia contraria entre la intensidad y el mejor y peor valor de CMJ medio semanal, similar a la encontrada con las pérdidas de salto.

En este sentido, el carácter longitudinal y continuado de nuestro trabajo nos permite hallar conclusiones más aplicables, ya que no se trata de analizar el efecto de unas determinadas sesiones aisladas, sino del conjunto de sesiones de largos periodos de entrenamiento, que nos permite alcanzar un mayor grado de validez del control de la evolución del CMJ como indicador del grado de esfuerzo o fatiga en el entrenamiento del deporte de competición.

Conclusiones

8. CONCLUSIONES

Los resultados de nuestro estudio principal presentan indicios razonables de que, dentro de los rangos de volúmenes e intensidades aplicados en este estudio, el CMJ es un buen indicador de la evolución de la condición física y de su relación con la magnitud de la carga de entrenamiento. Esta afirmación se basa en lo siguiente:

- Existe una relación negativa significativa entre el IC y la pérdida de CMJ en la sesión, lo que indica que las sesiones de mayor volumen (mayor IC) tienden a provocar menores pérdidas que las sesiones de mayor intensidad (menor IC). Por tanto, una conclusión relevante de este estudio es que una mayor intensidad tiende a producir una mayor pérdida de CMJ dentro de la sesión, pero al mismo tiempo una mayor intensidad en una sesión presenta una relación positiva con el valor de salto a las 24 horas.
- En relación con la conclusión anterior, la relación entre el IC y el CMJ a las 24 horas es dependiente del valor de IC utilizado. De manera que existe una relación positiva significativa cuando los valores de IC son menores de 8, mientras que la relación es negativa significativa cuando los valores son superiores a 8.
- El IC medio semanal muestra una relación negativa significativa con el valor de CMJ medio semanal de la misma semana.
- El IC medio semanal presenta una relación negativa significativa con el rendimiento en primera sesión de la semana siguiente, siempre 48 horas tras el último esfuerzo de la semana previa.
- El peor valor medio semanal de CMJ de cada temporada viene precedido de 4 semanas de IC elevado en progresión. Por el contrario, el IC medio semanal es bajo y tiende a disminuir progresivamente cuando se alcanzan los mejores valores medios de CMJ semanal.
- En conjunto, las relaciones encontradas entre el IC y el CMJ sugieren que el IC es un buen predictor de la carga real (grado de esfuerzo o fatiga) que supone el entrenamiento para el deportista.

El CMJ también parece ser un buen predictor del rendimiento del deportista tanto en

entrenamiento como en competición. Esta afirmación se basa en lo siguiente:

- Existe una relación positiva significativa entre el CMJ y la VSCF.
- El CMJ medio semanal tiende a aumentar en las 4 semanas previas a los mejores resultados en los test de VAM, tiempo límite, fuerza, 20 y 300 m y presenta una tendencia negativa cuando los resultados son los peores.

En relación con la evolución de los indicadores de rendimiento del deportista:

- Los resultados de la presente tesis doctoral sugieren que la capacidad de producir fuerza en la unidad de tiempo puede ser un factor importante en la mejora del rendimiento del deportista, representado por los valores en pruebas dependientes de las capacidades aeróbicas y anaeróbicas como el test de VAM y el test de 20 y 300 m.
- El mejor rendimiento en las pruebas de VAM y tiempo límite viene precedido de 4 de semanas con altos valores de IC. Esta evolución es opuesta cuando se obtiene el peor rendimiento.
- En relación con la conclusión anterior, el mejor rendimiento en pruebas de 20 y 300 m se obtiene cuando el IC de las 4 semanas previas es bajo. Por el contrario, el peor rendimiento en este tipo de pruebas viene precedido de 4 semanas de IC elevado.

En cuanto al estudio complementario presentado en esta tesis doctoral sobre las diferencias en el rendimiento obtenidas en tapiz y pista para deportistas altamente entrenados y familiarizados con este tipo de pruebas se presentan las siguientes conclusiones:

- Se alcanzan velocidades y tiempos significativamente mayores en un test incremental realizado en tapiz con un 1% de pendiente y el mismo test realizado en pista, a pesar de que no hubo diferencia en los indicadores de esfuerzo.

Aplicaciones prácticas

9. APLICACIONES PRÁCTICAS

De los resultados de nuestro estudio se deriva la sugerencia de que tanto los técnicos como los investigadores aborden procedimientos objetivos para el análisis de la carga aplicada a los deportistas.

Dada la fuerte relación entre el IC y las distintas variables de CMJ, se recomienda:

- Controlar la pérdida de salto vertical en la sesión como indicador del grado real de esfuerzo que le supone al deportista la carga realizada. De la misma forma, el control de la capacidad de salto puede servir para estimar el grado de fatiga a las 24-48 horas.
- Valorar el CMJ previo a la sesión, pues este puede aportar información muy útil de la disposición del deportista para afrontar el esfuerzo programado y permitir al entrenador realizar las modificaciones que se ajusten al estado de condición física deportista.
- El control de la evolución del salto vertical puede servir para conocer la evolución del rendimiento a lo largo de la temporada.
- La utilización de un IC como el descrito en este estudio y el control del cambio en la capacidad de salto a lo largo de un ciclo de entrenamiento, pueden ser utilizados para estimar el grado de fatiga agudo, a las 24 y 48 horas después de un entrenamiento.
- Las mejoras en los distintos factores determinantes del rendimiento en una especialidad como el 800 m, pueden necesitar combinaciones de IC opuestos. Esto refleja la necesidad de cuantificar y controlar la evolución del deportista si se quieren alcanzar los mejores rendimientos.

Por las diferencias encontradas en los test realizados en tapiz y pista, se recomienda:

- Los valores de rendimiento obtenidos en pruebas de laboratorio no pueden ser trasladados a los entrenamientos de los deportistas si estos se realizan en pista. Las diferencias deben tenerse en cuenta a la hora de ajustar los ritmos de entrenamiento.

Limitaciones de la investigación

10.LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Las limitaciones del estudio son las propias de un estudio de $n = 1$, especialmente con la generalización de los resultados. Pero por otra parte tiene la ventaja de que el estudio se realiza con un deportista de alto nivel y que las sesiones de entrenamiento y los protocolos de realización de los test se han llevado a cabo durante 4 temporadas deportivas. No existen problemas de maduración, ya que se trata de un deportista que al inicio del estudio tenía 28 años. Tampoco es un problema de validez interna el hecho de que el deportista cambiase la capacidad de rendimiento a lo largo de las temporadas, ya que las correlaciones entre variables son semejantes y de la misma tendencia en cada una de ellas, a pesar de que el rendimiento fue diferente. La influencia de la medida no es problema, ya que la medida de tres saltos previos y post sesión no es probable que sirva de estímulo de entrenamiento para un deportista de una alta capacidad de salto y muy habituado a la realización de estos tests, así como por el hecho de que el protocolo siempre fue el mismo.

Una limitación del estudio es no haber podido comparar todas las variables medidas con el rendimiento en competición. Aunque estaba inicialmente previsto, y durante la temporada 2015 se llevó a cabo, en el resto de las temporadas el deportista sufrió diversos contratiempos en los periodos competitivos que impidieron llevar a cabo este análisis con el rigor necesario. No obstante, la introducción de diferentes tests de condición física durante dichas temporadas, nos ha permitido tener información objetiva sobre la evolución del estado de forma del deportista en algunos factores determinantes del rendimiento como fuerza, velocidad y capacidad y potencia aeróbica y anaeróbica sin la influencia de factores externos que pueden darse en competición como las condiciones ambientales, la presencia de rivales, la táctica empleada o los objetivos de competición (carrera por puesto o por tiempo).

Otra posible limitación es no haber podido medir los valores de consumo de oxígeno del deportista en las pruebas de velocidad aeróbica máxima, que nos habría dado información de la relación entre la carga de entrenamiento y dichos valores. Sin embargo, nuestro objetivo siempre fue analizar la relación entre la carga de entrenamiento y el efecto sobre el rendimiento sin necesidad de conocer a que causas fisiológicas podrían deberse dichas mejoras. Por ese motivo, la medición de la velocidad aeróbica máxima es una variable que nos ofrece la información necesaria sobre la capacidad de rendir del deportista ante ese tipo de esfuerzos.

Por último, no se han podido realizar pruebas para medir los valores de indicadores estrés metabólico como lactato o amonio que hubiesen podido confirmar la capacidad del CMJ para predecir el grado de estrés metabólico.

Futuras líneas de investigación

11.FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Tras las conclusiones obtenidas en la presente tesis doctoral y una vez examinada la utilidad del CMJ como variable de control del estado físico del deportista y de la respuesta inmediata o en las horas posteriores a la aplicación de diferentes cargas de entrenamiento, a continuación se describen algunas cuestiones a resolver en el futuro:

- Analizar la evolución del IC y el CMJ en mayor número de deportistas de esta y otras especialidades deportivas.
- Analizar si la tendencia positiva entre la intensidad y el CMJ en la sesión consecutiva siguiente o en la sesión inicial de la semana siguiente, se debe a un estímulo provocado por la alta intensidad, a una recuperación debida al bajo volumen de entrenamiento o a una combinación de ambos, o una determinada proporción entre ambas.
- Estudiar el efecto de diferentes cargas de entrenamiento sobre los indicadores de rendimiento de fuerza, velocidad y potencia aeróbica y anaeróbica, y esos y su relación con el rendimiento en competición.

Bibliografía

12.BIBLIOGRAFÍA

- Aagaard, P., & Andersen, J. L. (2010). Effects of strength training on endurance capacity in top-level endurance athletes. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 20 Suppl 2, 39–47. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2010.01197.x>
- Abbiss, C. R., & Laursen, P. B. (2008). Describing and understanding pacing strategies during athletic competition. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 38(3), 239–252. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838030-00004>
- Arcelli, E., Bianchi, A., Tebaldini, J., Bonato, M., & Torre, A. La. (2012). Energy Production in the 800m. *New Studies in Athletics*, 27(3), 49–56.
- Bachero-Mena, B., & González-Badillo, J. J. (2021). Mechanical and Metabolic Responses during High-intensity Training in Elite 800-m Runners. *International Journal of Sports Medicine*, 42(4), 350–356. <https://doi.org/10.1055/a-1273-8564>
- Bachero-Mena, B., Pareja-Blanco, F., & González-Badillo, J. J. (2017). Enhanced strength and sprint levels, and changes in blood parameters during a complete athletics season in 800 m high-level athletes. *Frontiers in Physiology*, 8(AUG), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00637>
- Bachero-Mena, B., Pareja-Blanco, F., Rodríguez-Rosell, D., Yáñez-García, J. M., Mora-Custodio, R., & González-Badillo, J. J. (2017). Relationships between Sprint, Jumping and Strength Abilities, and 800 M Performance in Male Athletes of National and International Levels. *Journal of Human Kinetics*, 58(1), 187–195. <https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0076>
- Balsalobre-Fernández, C., Santos-Concejero, J., & Grivas, G. V. (2016). Effects of Strength Training on Running Economy in Highly Trained Runners: A Systematic Review With Meta-Analysis of Controlled Trials. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(8), 2361–2368. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001316>
- Balsalobre-Fernández, C., Tejero-González, C. M., & Del Campo-Vecino, J. (2014). Relationships between training load, salivary cortisol responses and performance

- during season training in middle and long distance runners. *PLoS ONE*, 9(8).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0106066>
- Balsalobre-Fernández, C., Tejero-González, C. M., & Del Campo-Vecino, J. (2015). Seasonal strength performance and its relationship with training load on elite runners. *Journal of Sports Science & Medicine*, 14(1), 9–15.
- Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2015). Running economy: measurement, norms, and determining factors. *Sports Medicine - Open*, 1(1), 8.
<https://doi.org/10.1186/s40798-015-0007-y>
- Beattie, K., Kenny, I. C., Lyons, M., & Carson, B. P. (2014). The effect of strength training on performance in endurance athletes. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 44(6), 845–865. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0157-y>
- Billat, V., Hamard, L., Koralsztein, J. P., & Morton, R. H. (2009). Differential modeling of anaerobic and aerobic metabolism in the 800-m and 1,500-m run. *Journal of Applied Physiology*, 107(2), 478–487.
<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.91296.2008>
- Billat, V., & Koralsztein, J. P. (1996). Significance of the velocity at VO₂max and time to exhaustion at this velocity. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 22(2), 90–108.
<https://doi.org/10.2165/00007256-199622020-00004>
- Bogdanis, G. C., Nevill, M. E., Boobis, L. H., & Lakomy, H. K. (1996). Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 80(3), 876–884.
<https://doi.org/10.1152/jappl.1996.80.3.876>
- Bompa, T., & Haff, G. (2009). Training theory and methodology. *Champaign, IL: Human Kinetics*.
- Bonaventura, J. M., Sharpe, K., Knight, E., Fuller, K. L., Tanner, R. K., & Gore, C. J. (2015). Reliability and accuracy of six hand-held blood lactate analysers. *Journal of Sports Science & Medicine*, 14(1), 203–214.
- Borresen, J., & Ian Lambert, M. (2009). The quantification of training load, the training

- response and the effect on performance. *Sports Medicine*, 39(9), 779–795.
<https://doi.org/10.2165/11317780-000000000-00000>
- Borresen, J., & Lambert, M. I. (2008). Quantifying training load: A comparison of subjective and objective methods. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 3(1), 16–30. <https://doi.org/10.1123/ijsp.3.1.16>
- Bosquet, L., Delhors, P. R., Duchene, A., Dupont, G., & Leger, L. (2007). Anaerobic running capacity determined from a 3-parameter systems model: Relationship with other anaerobic indices and with running performance in the 800 m-run. *International Journal of Sports Medicine*, 28(6), 495–500.
<https://doi.org/10.1055/s-2006-924516>
- Bosquet, L., Montpetit, J., Arvisais, D., & Mujika, I. (2007). Effects of tapering on performance: a meta-analysis. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 39(8), 1358–1365. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e31806010e0>
- Boullosa, D. A., & Tuimil, J. L. (2009). Postactivation potentiation in distance runners after two different field running protocols. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(5), 1560–1565. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181a3ce61>
- Boullosa, D. A., Tuimil, J. L., Alegre, L. M., Iglesias, E., & Lusquiños, F. (2011). Concurrent fatigue and potentiation in endurance athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(1), 82–93.
<https://doi.org/10.1123/ijsp.6.1.82>
- Bourdon, P. C., Cardinale, M., Murray, A., Gatin, P., Kellmann, M., Varley, M. C., ... Cable, N. T. (2017). Monitoring athlete training loads: Consensus statement. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12.
<https://doi.org/10.1123/IJSPP.2017-0208>
- Bowtell, M. V., Tan, H., & Wilson, A. M. (2009). The consistency of maximum running speed measurements in humans using a feedback-controlled treadmill, and a comparison with maximum attainable speed during overground locomotion. *Journal of Biomechanics*, 42(15), 2569–2574.
<https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.07.024>

- Brandon, L. J. (1995). Physiological Factors Associated with Middle Distance Running Performance. *Sports Medicine*, 19(4), 268–277. <https://doi.org/10.2165/00007256-199519040-00004>
- Bret, C., Messonnier, L., Nouck Nouck, J. M., Freund, H., Dufour, A. B., & Lacour, J. R. (2003). Differences in lactate exchange and removal abilities in athletes specialised in different track running events (100 to 1500 m). *International Journal of Sports Medicine*, 24(2), 108–113. <https://doi.org/10.1055/s-2003-38201>
- Bruno Gajer, Christine Hanon, José Marajo, J.-C. V. (2001). *Le 800 metres: Analyse descriptive et entraînement*. (Fédération française d'athlétisme, Ed.) (INSEP). Paris.
- Cappa, D. F., García, G. C., Secchi, J. D., & Maddigan, M. E. (2014). The relationship between an athlete's maximal aerobic speed determined in a laboratory and their final speed reached during a field test (UNCa Test). *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 54(4), 424–431.
- Casado, A., Hanley, B., Jiménez-Reyes, P., & Renfree, A. (2020). Pacing profiles and tactical behaviors of elite runners. *Journal of Sport and Health Science*. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2020.06.011>
- Casado, A., & Renfree, A. (2018). Fortune Favors the Brave: Tactical Behaviors in the Middle-Distance Running Events at the 2017 IAAF World Championships. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1–6. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0055>
- Cejuela-Anta, R., & Esteve-Lanao, J. (2011). Training load quantification in triathlon. *Journal of Human Sport and Exercise*, 6(2), 218–232.
- Chen, M. J., Fan, X., & Moe, S. T. (2002). Criterion-related validity of the Borg ratings of perceived exertion scale in healthy individuals: a meta-analysis. *Journal of Sports Sciences*, 20(11), 873–899. <https://doi.org/10.1080/026404102320761787>
- Christine Hanon, Claire Thomas, Jean-Michel Le Chevalier, Bruno Gajer, H. V. (2002). How does VO₂ evolve during the 800m? *New Studies in Athletics, IAAF*, 17(2), 61–68.

- Claudino, J. G., Cronin, J., Mezêncio, B., McMaster, D. T., McGuigan, M., Tricoli, V., ... Serrão, J. C. (2017). The countermovement jump to monitor neuromuscular status: A meta-analysis. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 20(4), 397–402. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2016.08.011>
- Comfort, P., Bullock, N., & Pearson, S. J. (2012). A comparison of maximal squat strength and 5-, 10-, and 20-meter sprint times, in athletes and recreationally trained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(4), 937–940. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31822e5889>
- Cooper, K. H. (1968). A means of assessing maximal oxygen intake. Correlation between field and treadmill testing. *JAMA*, 203(3), 201–204.
- Coutts, A., Crowcroft, S., & Kempton, T. (2017). Developing athlete monitoring systems: Theoretical basis and practical applications1.
- Coyne, J. O. C., Gregory Haff, G., Coutts, A. J., Newton, R. U., & Nimphius, S. (2018). The Current State of Subjective Training Load Monitoring-a Practical Perspective and Call to Action. *Sports Medicine - Open*, 4(1), 58. <https://doi.org/10.1186/s40798-018-0172-x>
- Craig, I. S., & Morgan, D. W. (1998). Relationship between 800-m running performance and accumulated oxygen deficit in middle-distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 30(11), 1631–1636. <https://doi.org/10.1097/00005768-199811000-00012>
- Daniels, J., & Daniels, N. (1992). Running economy of elite male and elite female runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(4), 483–489.
- Davies, C. T. (1980). Effects of wind assistance and resistance on the forward motion of a runner. *Journal of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 48(4), 702–709. <https://doi.org/10.1152/jappl.1980.48.4.702>
- De Blas, X., Padullés, J. M., Del Amo, J. L. L., & Guerra-Balic, M. (2012). Creación y validación de Chronojump-Boscosystem: un instrumento libre para la medición de saltos verticales. *RICYDE: Revista Internacional de Ciencias Del Deporte*, 8(30), 334–356. <https://doi.org/10.5232/ricyde2012.03004>

- de Koning, J. J., Foster, C., Bakkum, A., Kloppenburg, S., Thiel, C., Joseph, T., ... Porcari, J. P. (2011). Regulation of pacing strategy during athletic competition. *PloS One*, 6(1), e15863. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0015863>
- Deason, J., Powers, S. K., Lawler, J., Ayers, D., & Stuart, M. K. (1991). Physiological correlates to 800 meter running performance. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 31(4), 499—504. Retrieved from <http://europepmc.org/abstract/MED/1806725>
- Duffield, R., Bishop, D., & Dawson, B. (2006). Comparison of the VO₂ response to 800-m, 1500-m and 3000-m track running events. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 46(3), 353—360. Retrieved from <http://europepmc.org/abstract/MED/16998437>
- Earp, J. E., & Newton, R. U. (2012). Advances in electronic timing systems: considerations for selecting an appropriate timing system. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 26(5), 1245–1248. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182474436>
- Festa, L., Tarperi, C., Skroce, K., La Torre, A., & Schena, F. (2020). Effects of Different Training Intensity Distribution in Recreational Runners. *Frontiers in Sports and Active Living*, 1, 70. <https://doi.org/10.3389/fspor.2019.00070>
- Filipas, L., Nerli Ballati, E., Bonato, M., La Torre, A., & Piacentini, M. F. (2018). Elite Male and Female 800-m Runners' Display of Different Pacing Strategies During Season-Best Performances. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1–5. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0137>
- Foster, C., deKoning, J. J., Hettinga, F., Lampen, J., Dodge, C., Bobbert, M., & Porcari, J. P. (2004). Effect of competitive distance on energy expenditure during simulated competition. *International Journal of Sports Medicine*, 25(3), 198–204. <https://doi.org/10.1055/s-2003-45260>
- Foster, C., Florhaug, J. A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L. A., Parker, S., ... Dodge, C. (2001). A new approach to monitoring exercise training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15(1), 109–115.

- Foster, C, Schrager, M., Snyder, A. C., & Thompson, N. N. (1994). Pacing strategy and athletic performance. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 17(2), 77–85.
<https://doi.org/10.2165/00007256-199417020-00001>
- Foster, Carl, Florhaug, J. A., Franklin, J., Gottschall, L., Hrovatin, L. A., Parker, S., ... Dodge, C. (2001). A New Approach to Monitoring Exercise Training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 15(1), 109–115.
[https://doi.org/10.1519/1533-4287\(2001\)015<0109:ANATME>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1519/1533-4287(2001)015<0109:ANATME>2.0.CO;2)
- Foster, Carl, Rodriguez-Marroyo, J. A., & de Koning, J. J. (2017). Monitoring Training Loads: The Past, the Present, and the Future. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(Suppl 2), S22–S28.
<https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0388>
- García-Pallarés, J., & Izquierdo, M. (2011). Strategies to optimize concurrent training of strength and aerobic fitness for rowing and canoeing. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 41(4), 329–343. <https://doi.org/10.2165/11539690-000000000-00000>
- García-Pinillos, F., Soto-Hermoso, V. M., & Latorre-Román, P. A. (2015). Acute effects of extended interval training on countermovement jump and handgrip strength performance in endurance athletes: postactivation potentiation. *J Strength Cond Res*, 29(1), 11–21. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000000591>
- Gathercole, R. J., Sporer, B. C., Stellingwerff, T., & Sleivert, G. G. (2015). Comparison of the Capacity of Different Jump and Sprint Field Tests to Detect Neuromuscular Fatigue. *Journal of Strength and Conditioning Research / National Strength & Conditioning Association*, 29(9), 2522–2531.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000912>
- González-Badillo, J J, Rodríguez-Rosell, D., Sánchez-Medina, L., Ribas, J., López-López, C., Mora-Custodio, R., ... Pareja-Blanco, F. (2016). Short-term Recovery Following Resistance Exercise Leading or not to Failure. *International Journal of Sports Medicine*, 37(4), 295–304. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1564254>
- González-Badillo, Juan José, & Ribas-Serna, J. (2002). *Bases de la programación del entrenamiento de fuerza* (Vol. 308). Inde.

- González-Mohino, F., Del Cerro, J. S., Renfree, A., Yustres, I., & González-Ravé, J. M. (2020). The Relationship between Tactical Positioning and the Race Outcome in 800-M Running at the 2016 Olympic Games and 2017 IAAF World Championship. *Journal of Human Kinetics*, 71, 299–305. <https://doi.org/10.2478/hukin-2019-0090>
- Gorostiaga, E. M., Asiáin, X., Izquierdo, M., Postigo, A., Aguado, R., Alonso, J. M., & Ibáñez, J. (2010). Vertical jump performance and blood ammonia and lactate levels during typical training sessions in elite 400-m runners. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(4), 1138–1149. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181cf769f>
- Gupta, S., Stanula, A., & Goswami, A. (2021). Peak Blood Lactate Concentration and Its Arrival Time Following Different Track Running Events in Under-20 Male Track Athletes. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1–9. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0685>
- Hanley, B., & Hettinga, F. J. (2018). Champions are racers, not pacers: an analysis of qualification patterns of Olympic and IAAF World Championship middle distance runners. *Journal of Sports Sciences*, 36(22), 2614–2620. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1472200>
- Hanley, B., Stellingwerff, T., & Hettinga, F. J. (2019). Successful Pacing Profiles of Olympic and IAAF World Championship Middle-Distance Runners Across Qualifying Rounds and Finals. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(7), 894–901. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0742>
- Hanon, C., Lepretre, P. M., Bishop, D., & Thomas, C. (2010). Oxygen uptake and blood metabolic responses to a 400-m run. *European Journal of Applied Physiology*, 109(2), 233–240. <https://doi.org/10.1007/s00421-009-1339-4>
- Hanon, C., Levêque, J., Vivier, L., & Thomas, C. (2007). Oxygen uptake in the 1500 metres. *New Studies in Athletes*, 22(1), 15–22.
- Hanon, C., & Thomas, C. (2011). Effects of optimal pacing strategies for 400-, 800-, and 1500-m races on the $\dot{V}O_2$ response. *Journal of Sports Sciences*, 29(9), 905–912. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.562232>

- Heck, H., Mader, A., Hess, G., Mücke, S., Müller, R., & Hollmann, W. (1985). Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. *International Journal of Sports Medicine*, 6(3), 117–130. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1025824>
- Hettinga, F. J., Konings, M. J., & Pepping, G.-J. (2017). The Science of Racing against Opponents: Affordance Competition and the Regulation of Exercise Intensity in Head-to-Head Competition. *Frontiers in Physiology*, 8, 118. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00118>
- Hill, D. W. (1999). Energy system contributions in middle-distance running events. *Journal of Sports Sciences*, 17(6), 477–483. <https://doi.org/10.1080/026404199365786>
- Hudgins, B., Scharfenberg, J., Triplett, N. T., & McBride, J. M. (2013). Relationship between jumping ability and running performance in events of varying distance. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(3), 563–567. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e31827e136f>
- Ian Lambert, M., & Borresen, J. (2010). Measuring training load in sports. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(3), 406–411. <https://doi.org/10.1123/ijsp.5.3.406>
- Impellizzeri, F. M., Marcora, S. M., & Coutts, A. J. (2019). Internal and External Training Load: 15 Years On. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(2), 270–273. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0935>
- Ingham, S. A., Whyte, G. P., Pedlar, C., Bailey, D. M., Dunman, N., & Nevill, A. M. (2008). Determinants of 800-m and 1500-m running performance using allometric models. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(2), 345–350. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e31815a83dc>
- Izquierdo-Gabarren, M., González De Txabarri Expósito, R., García-pallarés, J., Sánchez-medina, L., De Villarreal, E. S. S., & Izquierdo, M. (2010). Concurrent endurance and strength training not to failure optimizes performance gains. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(6), 1191–1199. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181c67eec>

- James, D. V. B., Sandals, L. E., Draper, S. B., Maldonado-Martin, S., & Wood, D. M. (2007). VO₂ attained during treadmill running: the influence of a specialist (400-m or 800-m) event. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2(2), 128–136. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2.2.128>
- Jimenez-Reyes, P., Pareja-Blanco, F., Cuadrado-Peñafiel, V., Morcillo, J., Párraga, J., & González-Badillo, J. (2016). Mechanical, Metabolic and Perceptual Response during Sprint Training. *International Journal of Sports Medicine*. <https://doi.org/10.1055/s-0042-107251>
- Jiménez-Reyes, P., & González-Badillo, J. J. (2011a). Control de la carga de entrenamiento a través del CMJ en pruebas de velocidad y saltos para optimizar el rendimiento deportivo en atletismo.(Monitoring training load through the CMJ in sprints and jump events for optimizing performance in athletics). *Cultura, Ciencia y Deporte*, 6(18), 207–217.
- Jiménez-Reyes, P., & González-Badillo, J. J. (2011b). Monitoring training load through the CMJ in sprints and jump events for optimizing performance in athletics. *Cultura, Ciencia y Deporte*, 7(18), 207–217.
- Jiménez-Reyes, P., Molina-Reina, M., González-Hernández, J., & González-Badillo, J. (2013). METABOLIC AND MECHANICAL RESPONSES TO 200–400 M RACES IN HIGH LEVEL SPRINTERS. In *British Journal of Sports Medicine* (Vol. 47, p. e4.10-e4). <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-093073.18>
- Jiménez-Reyes, Pedro, Pareja-Blanco, F., Cuadrado-Peñafiel, V., Ortega-Becerra, M., Párraga, J., & González-Badillo, J. J. (2019). Jump height loss as an indicator of fatigue during sprint training. *Journal of Sports Sciences*, 37(9), 1029–1037. <https://doi.org/10.1080/02640414.2018.1539445>
- Jones, A. M., & Doust, J. H. (1996). A 1% treadmill grade most accurately reflects the energetic cost of outdoor running. *Journal of Sports Sciences*, 14(4), 321–327. <https://doi.org/10.1080/02640419608727717>
- Jones, A. M., & Whipp, B. J. (2002). Bioenergetic constraints on tactical decision making in middle distance running. *British Journal of Sports Medicine*, 36(2), 102–104. <https://doi.org/10.1136/bjism.36.2.102>

- Jones, A. M., Wilkerson, D. P., Vanhatalo, A., & Burnley, M. (2008). Influence of pacing strategy on O₂ uptake and exercise tolerance. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 18(5), 615–626. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2007.00725.x>
- Kenneally, M., Casado, A., & Santos-Concejero, J. (2018). The effect of periodization and training intensity distribution on middle-and long-distance running performance: A systematic review. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(9), 1114–1121. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2017-0327>
- Kenney, W. L., & Hodgson, J. L. (1985). Variables predictive of performance in elite middle-distance runners. *British Journal of Sports Medicine*, 19(4), 207–209. <https://doi.org/10.1136/bjism.19.4.207>
- Lacour, J. R., Barth, J. C., & Dormois, D. (1990). Physiology Applied The energetics of middle-distance running, 38–43.
- Lacour, J. R., Bouvat, E., & Barthélémy, J. C. (1990). Post-competition blood lactate concentrations as indicators of anaerobic energy expenditure during 400-m and 800-m races. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 61(3–4), 172–176. <https://doi.org/10.1007/BF00357594>
- Lanferdini, F. J., Silva, E. S., Machado, E., Fischer, G., & Peyré-Tartaruga, L. A. (2020). Physiological Predictors of Maximal Incremental Running Performance. *Frontiers in Physiology*, 11, 979. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00979>
- Léger, L., & Boucher, R. (1980). An indirect continuous running multistage field test: the Université de Montréal track test. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences. Journal Canadien Des Sciences Appliquees Au Sport*, 5(2), 77–84.
- Leif Inge Tjelta. (2013). A Longitudinal Case Study of the Training of the 2012 European 1500m Track Champion. *IJASS(International Journal of Applied Sports Sciences)*, 25(1), 11–18. <https://doi.org/10.24985/ijass.2013.25.1.11>
- Londeree, B. R. (1986). The use of laboratory test results with long distance runners. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 3(3), 201–213. <https://doi.org/10.2165/00007256-198603030-00004>

- Loturco, I., D'Angelo, R. A., Fernandes, V., Gil, S., Kobal, R., Cal Abad, C. C., ... Nakamura, F. Y. (2015). Relationship between sprint ability and loaded/unloaded jump tests in elite sprinters. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(3), 758–764. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000660>
- Loturco, I., Pereira, L. A., Cal Abad, C. C., D'Angelo, R. A., Fernandes, V., Kitamura, K., ... Nakamura, F. Y. (2015). Vertical and Horizontal Jump Tests Are Strongly Associated With Competitive Performance in 100-m Dash Events. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(7), 1966–1971. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000849>
- Lucía, A., Hoyos, J., Santalla, A., Earnest, C., & Chicharro, J. L. (2003). Tour de France versus Vuelta a España: Which is harder? *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 35(5), 872–878. <https://doi.org/10.1249/01.MSS.0000064999.82036.B4>
- Malone, J. J., Murtagh, C. F., Morgans, R., Burgess, D. J., Morton, J. P., & Drust, B. (2015). Countermovement jump performance is not affected during an in-season training microcycle in elite youth soccer players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(3), 752–757. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000701>
- Manzi, V., Iellamo, F., Impellizzeri, F., D'Ottavio, S., & Castagna, C. (2009). Relation between individualized training impulses and performance in distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(11), 2090–2096. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181a6a959>
- Marco-Contreras, L. A., Bachero-Mena, B., & González-Badillo, J. J. (2020). Comparison of the maximal aerobic speed obtained in a motorised treadmill or athletic track test in middle-distance women runners of national and international level. In *The Journal of Strength & Conditioning Research* (Vol. 34, pp. 3–4). <https://doi.org/10.1519/JSC.00000000000003531>
- Marco-Contreras, L. A., Bachero-Mena, B., Rodríguez-Rosell, D., & González-Badillo, J. J. (2021). Load Index and Vertical Jump to Monitor Neuromuscular Fatigue in an Elite 800-m Athlete. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1–5. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2020-0474>

- Markström, J. L., & Olsson, C.-J. (2013). Countermovement jump peak force relative to body weight and jump height as predictors for sprint running performances: (in)homogeneity of track and field athletes? *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(4), 944–953. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e318260edad>
- McLaughlin, J. E., Howley, E. T., Bassett, D. R. J., Thompson, D. L., & Fitzhugh, E. C. (2010). Test of the classic model for predicting endurance running performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(5), 991–997. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181c0669d>
- McMiken, D. F., & Daniels, J. T. (1976). Aerobic requirements and maximum aerobic power in treadmill and track running. *Medicine and Science in Sports*, 8(1), 14–17.
- Meeusen, R., Duclos, M., Foster, C., Fry, A., Gleeson, M., Nieman, D., ... Urhausen, A. (2013). Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 45(1), 186–205. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318279a10a>
- Meyer, T., Welter, J.-P., Scharhag, J., & Kindermann, W. (2003). Maximal oxygen uptake during field running does not exceed that measured during treadmill exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 88(4–5), 387–389. <https://doi.org/10.1007/s00421-002-0718-x>
- Miller, J. R., Van Hooren, B., Bishop, C., Buckley, J. D., Willy, R. W., & Fuller, J. T. (2019). A Systematic Review and Meta-Analysis of Crossover Studies Comparing Physiological, Perceptual and Performance Measures Between Treadmill and Overground Running. *Sports Medicine*, (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01087-9>
- Mooses, M., Tippi, B., Mooses, K., Durussel, J., & Mäestu, J. (2015). Better economy in field running than on the treadmill: evidence from high-level distance runners. *Biology of Sport*, 32(2), 155–159. <https://doi.org/10.5604/20831862.1144418>
- Morcillo, J. A., Jiménez-Reyes, P., Cuadrado-Peñafiel, V., Lozano, E., Ortega-Becerra, M., & Párraga, J. (2015). Relationships between repeated sprint ability, mechanical parameters, and blood metabolites in professional soccer players. *Journal of*

Strength and Conditioning Research, 29(6), 1673–1682.

<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000782>

- Morin, J.-B., & Sève, P. (2011). Sprint running performance: comparison between treadmill and field conditions. *European Journal of Applied Physiology*, 111(8), 1695–1703. <https://doi.org/10.1007/s00421-010-1804-0>
- Mujika, I. (1998). The influence of training characteristics and tapering on the adaptation in highly trained individuals: a review. *International Journal of Sports Medicine*, 19(7), 439–446. <https://doi.org/10.1055/s-2007-971942>
- Mujika, Iñigo. (2017). Quantification of Training and Competition Loads in Endurance Sports: Methods and Applications. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 12(Suppl 2), S29–S217. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2016-0403>
- Nevill, A. M., Ramsbottom, R., Nevill, M. E., Newport, S., & Williams, C. (2008). The relative contributions of anaerobic and aerobic energy supply during track 100-, 400- and 800-m performance. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 48(2), 138–142.
- Noakes, T. D., Myburgh, K. H., & Schall, R. (1990). Peak treadmill running velocity during the VO₂ max test predicts running performance. *Journal of Sports Sciences*, 8(1), 35–45. <https://doi.org/10.1080/02640419008732129>
- Nummela, A., Härmäläinen, I., & Rusko, H. (2007). Comparison of maximal anaerobic running tests on a treadmill and track. *Journal of Sports Sciences*, 25(1), 87–96. <https://doi.org/10.1080/02640410500497717>
- Olesen, H. L., Raabo, E., Bangsbo, J., & Secher, N. H. (1994). Maximal oxygen deficit of sprint and middle distance runners. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 69(2), 140–146. <https://doi.org/10.1007/BF00609406>
- Paavolainen, L., Häkkinen, K., Härmäläinen, I., Nummela, A., & Rusko, H. (1999). Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 86(5), 1527–1533. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.86.5.1527>

- Paavolainen, L., Häkkinen, K., Nummela, A., & Rusko, H. (1994). Neuromuscular characteristics and fatigue in endurance and sprint athletes during a new anaerobic power test. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 69(2), 119–126. <https://doi.org/10.1007/BF00609403>
- Pareja-Blanco, F., Rodríguez-Rosell, D., Sánchez-Medina, L., Ribas-Serna, J., López-López, C., Mora-Custodio, R., ... González-Badillo, J. J. (2016). Acute and delayed response to resistance exercise leading or not leading to muscle failure. *Clinical Physiology and Functional Imaging*. <https://doi.org/10.1111/cpf.12348>
- Pareja-Blanco, F., Rodríguez-Rosell, D., Sánchez-Medina, L., Ribas-Serna, J., López-López, C., Mora-Custodio, R., ... González-Badillo, J. J. (2017). Acute and delayed response to resistance exercise leading or not leading to muscle failure. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 37(6), 630–639. <https://doi.org/10.1111/cpf.12348>
- Pareja-Blanco, F., Villalba-Fernández, A., Cornejo-Daza, P. J., Sánchez-Valdepeñas, J., & González-Badillo, J. J. (2019). Time Course of Recovery Following Resistance Exercise with Different Loading Magnitudes and Velocity Loss in the Set. *Sports (Basel, Switzerland)*, 7(3), 1–10. <https://doi.org/10.3390/sports7030059>
- Parmar, A., Jones, T. W., & Hayes, P. R. (2021). The dose-response relationship between interval-training and VO₂(max) in well-trained endurance runners: A systematic review. *Journal of Sports Sciences*, 1–18. <https://doi.org/10.1080/02640414.2021.1876313>
- Perrey, S., Candau, R., Millet, G. Y., Borrani, F., & Rouillon, J. D. (2002). Decrease in oxygen uptake at the end of a high-intensity submaximal running in humans. *International Journal of Sports Medicine*, 23(4), 298–304. <https://doi.org/10.1055/s-2002-29082>
- Peserico, C. S., & Machado, F. A. (2014). Comparison between running performance in time trials on track and treadmill. *Revista Brasileira de Cineantropometria & Desempenho Humano*, 16, 456–464. Retrieved from http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-00372014000400456&nrm=iso

- Pugh, L. G. (1970). Oxygen intake in track and treadmill running with observations on the effect of air resistance. *The Journal of Physiology*, 207(3), 823–835.
<https://doi.org/10.1113/jphysiol.1970.sp009097>
- Pugh, L. G. (1971). The influence of wind resistance in running and walking and the mechanical efficiency of work against horizontal or vertical forces. *The Journal of Physiology*, 213(2), 255–276. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1971.sp009381>
- Rabadán, M., Díaz, V., Calderón, F. J., Benito, P. J., Peinado, A. B., & Maffulli, N. (2011). Physiological determinants of speciality of elite middle- and long-distance runners. *Journal of Sports Sciences*, 29(9), 975–982.
<https://doi.org/10.1080/02640414.2011.571271>
- Renfree, A., & Casado, A. (2018). Athletic Races Represent Complex Systems, and Pacing Behavior Should Be Viewed as an Emergent Phenomenon. *Frontiers in Physiology*, 9, 1432. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01432>
- Renfree, A., Casado, A., & McLaren, S. (2021). Re-thinking athlete training loads: would you rather have one big rock or lots of little rocks dropped on your foot? *Research in Sports Medicine (Print)*, 1–4.
<https://doi.org/10.1080/15438627.2021.1906672>
- Renfree, A., Mytton, G. J., Skorski, S., & Clair Gibson, A. S. (2014). Tactical considerations in the middle-distance running events at the 2012 olympic games: A case study. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(2), 362–364. <https://doi.org/10.1123/IJSPP.2013-0020>
- Riggs, C. E. J., Johnson, D. J., Konopka, B. J., & Kilgour, R. D. (1981). Exercise heart rate response to facial cooling. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 47(4), 323–330. <https://doi.org/10.1007/BF02332959>
- Rønnestad, B R, & Mujika, I. (2014). Optimizing strength training for running and cycling endurance performance: A review. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 24(4), 603–612. <https://doi.org/10.1111/sms.12104>
- Rønnestad, Bent R, Hansen, E. A., & Raastad, T. (2012). High volume of endurance training impairs adaptations to 12 weeks of strength training in well-trained

- endurance athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 112(4), 1457–1466.
<https://doi.org/10.1007/s00421-011-2112-z>
- Sánchez-Medina, L., & González-Badillo, J. J. (2011a). Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 43(9), 1725–1734. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e318213f880>
- Sánchez-Medina, L., & González-Badillo, J. J. (2011b). Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318213f880>
- Sandals, L. E., Wood, D. M., Draper, S. B., & James, D. V. B. (2006). Influence of pacing strategy on oxygen uptake during treadmill middle-distance running. *International Journal of Sports Medicine*, 27(1), 37–42. <https://doi.org/10.1055/s-2005-837468>
- Sandford, A. G. N., Allen, S. V, Kilding, A. E., & Ross, A. (2018). Anaerobic speed reserve : a key component of elite male 800m running. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(4), 501–508. Retrieved from <https://journals.humankinetics.com/view/journals/ijsp/14/4/article-p501.xml>
- Sandford, G. N., Pearson, S. N., Allen, S., Malcata, R., Kilding, A., Ross, A., & Laursen, P. (2018). Tactical Behaviors in Men’s 800-m Olympic and World-Championship Medalists: A Changing of the Guard. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13 2, 246–249.
- Seiler, K. S., & Kjerland, G. Ø. (2006). Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: Is there evidence for an “optimal” distribution? *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 16(1), 49–56.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2004.00418.x>
- Seitz, L. B., Reyes, A., Tran, T. T., Saez de Villarreal, E., & Haff, G. G. (2014). Increases in lower-body strength transfer positively to sprint performance: a systematic review with meta-analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 44(12), 1693–1702. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0227-1>
- Smith, D. J. (2003). A framework for understanding the training process leading to elite

- performance. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 33(15), 1103–1126.
<https://doi.org/10.2165/00007256-200333150-00003>
- Smits, B. L. M., Pepping, G.-J., & Hettinga, F. J. (2014). Pacing and decision making in sport and exercise: the roles of perception and action in the regulation of exercise intensity. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 44(6), 763–775.
<https://doi.org/10.1007/s40279-014-0163-0>
- Spencer, M. R., & Gastin, P. B. (2001). Energy system contribution during 200- to 1500-m running in highly trained athletes. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(1), 157–162. <https://doi.org/10.1097/00005768-200101000-00024>
- Spencer, M. R., Gastin, P. B., & Payne, W. R. (1996). Energy system contribution during 400 to 1500 metres running. *New Studies in Athletics*, 11(4), 59–65.
- St Clair Gibson, A., Lambert, E. V., Rauch, L. H. G., Tucker, R., Baden, D. A., Foster, C., & Noakes, T. D. (2006). The role of information processing between the brain and peripheral physiological systems in pacing and perception of effort. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 36(8), 705–722. <https://doi.org/10.2165/00007256-200636080-00006>
- Støren, O., Helgerud, J., Støa, E. M., & Hoff, J. (2008). Maximal strength training improves running economy in distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 40(6), 1087–1092. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e318168da2f>
- Taipale, R. S., Mikkola, J., Nummela, A., Vesterinen, V., Capostagno, B., Walker, S., ... Häkkinen, K. (2010). Strength training in endurance runners. *International Journal of Sports Medicine*, 31(7), 468–476. <https://doi.org/10.1055/s-0029-1243639>
- Taipale, R. S., Mikkola, J., Vesterinen, V., Nummela, A., & Häkkinen, K. (2013). Neuromuscular adaptations during combined strength and endurance training in endurance runners: maximal versus explosive strength training or a mix of both. *European Journal of Applied Physiology*, 113(2), 325–335.
<https://doi.org/10.1007/s00421-012-2440-7>
- Thiel, C., Foster, C., Banzer, W., & De Koning, J. (2012). Pacing in Olympic track

- races: competitive tactics versus best performance strategy. *Journal of Sports Sciences*, 30(11), 1107–1115. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.701759>
- Thomas, C., Hanon, C., Perrey, S., Le Chevalier, J. M., Couturier, A., & Vandewalle, H. (2005). Oxygen uptake response to an 800-m running race. *International Journal of Sports Medicine*, 26(4), 268–273. <https://doi.org/10.1055/s-2004-820998>
- Tucker, R., & Noakes, T. D. (2009). The physiological regulation of pacing strategy during exercise: A critical review. *British Journal of Sports Medicine*, 43(6), 1–10. <https://doi.org/10.1136/bjsm.2009.057562>
- Tucker, Ross, Lambert, M. I., & Noakes, T. D. (2006). An analysis of pacing strategies during men's world-record performances in track athletics. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1(3), 233–245. <https://doi.org/10.1123/ijsp.1.3.233>
- van Ingen Schenau, G. J. (1980). Some fundamental aspects of the biomechanics of overground versus treadmill locomotion. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 12(4), 257–261.
- Viitasalo, J. T. (1985). *Measurement of force-velocity characteristics for sports-men in field conditions*.
- Wallace, L. K., Slaterry, K. M., & Coutts, A. J. (2014). A comparison of methods for quantifying training load: Relationships between modelled and actual training responses. *European Journal of Applied Physiology*, 114(1), 11–20. <https://doi.org/10.1007/s00421-013-2745-1>
- Watkins, C. M., Barillas, S. R., Wong, M. A., Archer, D. C., Dobbs, I. J., Lockie, R. G., ... Brown, L. E. (2017). Determination of Vertical Jump as a Measure of Neuromuscular Readiness and Fatigue. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 31(12), 3305–3310. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002231>
- Wenger, H. A., & Bell, G. J. (1986). The interactions of intensity, frequency and duration of exercise training in altering cardiorespiratory fitness. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 3(5), 346–356. <https://doi.org/10.2165/00007256-198603050->

00004

Williams, P. A., & Kilgour, R. D. (1993). Cardiovascular responses to facial cooling during low and moderate intensity exercise. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 67(1), 53–58.
<https://doi.org/10.1007/BF00377705>

Relación de tablas y figuras

13.RELACIÓN DE TABLAS Y FIGURAS

RELACIÓN DE TABLAS

Número	Título	Página
5.1	Características de los sujetos (medias \pm dt) (n=10)	39
5.2	Correlaciones entre índice de carga semanal y la intensidad y el volumen semanal	46
5.3	Resumen de la programación de los test de valoración de rendimiento durante cada temporada	53
5.4	Ejemplo de una semana de evaluación en función de la temporada.	54
5.5	Ejemplo de la distribución de las cargas en una semana de entrenamiento del deportista (temporada 2016, semana 5)	56
6.1	Resultados de las distintas variables analizadas en un test incremental realizado en pista y un test incremental realizado en tapiz rodante en hombres corredoras de medio fondo de nivel nacional e internacional.	60
6.2	Tabla resumen de las variables analizadas durante la temporada 2015 de pista cubierta.	61
6.3	Tabla resumen de las variables analizadas durante la temporada 2015 de aire libre.	62
6.4	Correlaciones significativas entre las variables índice de carga, CMJ inicial, pérdida de CMJ en la sesión y valoración subjetiva de la condición física por sesión en cada temporada completa.	63
6.5	Correlaciones entre las variables índice de carga, CMJ inicial en la sesión, pérdida de CMJ en la sesión y valoración subjetiva de la condición física por sesión en la temporada de pista cubierta de cada temporada (sólo se indican las relaciones significativas o próximas a la significatividad).	64
6.6	Correlaciones entre las variables índice de carga, CMJ inicial en la sesión, pérdida de CMJ en la sesión y valoración subjetiva de la condición física por sesión en la temporada de aire libre de cada temporada (sólo se indican las relaciones significativas).	65
6.7	Correlaciones entre el IC y el CMJ a las 24h por sesión con distintos valores de IC en cada una de las temporadas.	66
6.8	Correlaciones entre los valores medios semanales de índice de carga y el CMJ inicial, CMJ inicial de la siguiente semana y la valoración subjetiva de la condición física por temporada. (sólo se indican las relaciones significativas o próximas a la significatividad).	68
6.9	Correlaciones entre los valores medios semanales de índice de carga y CMJ inicial, CMJ inicial de la siguiente semana y valoración subjetiva de la condición física en la temporada de pista cubierta de cada temporada. (sólo se indican las relaciones significativas o próximas a la significatividad).	69
6.10	Correlaciones entre los valores medios semanales de índice de carga y CMJ inicial, CMJ inicial de la siguiente semana y	69

	valoración subjetiva de la condición física en la temporada de pista aire libre de cada temporada. (sólo se indican las relaciones significativas o próximas a la significatividad).	
6.11	Correlaciones entre los valores medios semanales de VSCF y CMJ inicial en la temporada 2015	69
6.12	Resultados de los test de velocidad aeróbica máxima a lo largo de todas las temporadas analizadas	70
6.13	Resultados de los test de tiempo límite realizados a lo largo de todas las temporadas analizadas.	72
6.14	Resultados de los diferentes test de 300m de las temporadas analizadas.	72
6.15	Resultados de las pruebas realizadas en los tests de fuerza de las temporadas analizadas.	73
6.16	Evolución del IC medio semanal las 4 semanas previas al mejor y peor test de VAM	74
6.17	Evolución de la pérdida de CMJ medio semanal las 4 semanas previas al mejor y peor test de VAM y tiempo límite.	75
6.18	Evolución de la pérdida de CMJ medio semanal las 4 semanas previas al mejor y peor test de 20 m y 300 m.	76

RELACIÓN DE FIGURAS

Número	Título	Página
1	Evolución del consumo de oxígeno (arriba) y la velocidad (abajo) durante la prueba de 800 m (Christine Hanon, Claire Thomas, Jean-Michel Le Chevalier, Bruno Gajer, 2002)	23
2	Evolución del consumo de oxígeno (línea negra con marcadores cuadrados) y la velocidad de carrera (línea gris con marcadores redondos) durante la prueba de 800 m en 5 corredores muy entrenados (Thomas et al., 2005)	23
3	Evolución de los valores medios de FC durante una prueba de 800 metros (Thomas et al., 2005)	26
4	Escala de percepción de esfuerzo de 0 a 10 que se completa 30 minutos después de finalizar el esfuerzo (C Foster et al., 2001)	30
5.2	Tapiz rodante (Valiant 2 Sport, LODE, Groningen, Netherland)	42
5.2	Representación gráfica de la ejecución del salto vertical con contramovimiento mostrando las principales fases del movimiento. A: posición inicial; B: máxima flexión de piernas; C: despegue; D: aterrizaje	43
5.3	Plataforma de contacto (Ergojump-Boscosystem, Barcelona, España)	43
5.4	Analizador de lactato portátil Lactate Pro 2 (Arkray, Japan)	44
5.5	Pulsímetro portátil (Polar V800, Polar Electro OY)	44
5.6	Fotocélulas eléctricas (Polifemo Radio Light, Microgate, Italia)	49
5.7	Máquina tipo “ <i>Smith</i> ”	51
5.8	Distribución del tiempo de entrenamiento según las zonas de intensidad en la temporada 2015	57
6.1	Evolución del IC y el CMJ24h en la temporada 2015	66
6.2	Evolución del IC y el CMJ24h en la temporada 2015 con valores de IC<8 (A) y con valores de IC>8 (B).	67
6.3	Evolución del rendimiento en el test de VAM durante la temporada 2016 completa	71
6.4	Evolución del IC medio semanal de las 4 semanas previas al mejor y peor resultado en el test de VAM y tiempo límite	74
6.5	Evolución del % pérdida CMJ medio semanal de cada sesión de las 4 semanas previas al mejor y peor resultado en el test de VAM y tiempo límite	75
6.6	Evolución del porcentaje de pérdida de CMJ medio semanal de cada sesión de las 4 semanas previas al mejor y peor resultado en el test de 20 y 300 m.	76
6.7	Evolución del CMJ medio semanal de cada sesión de las 4 semanas previas al mejor y peor resultado en el test de 20 y 300 m	76
6.8	Evolución del IC medio semanal de las 4 semanas previas al mejor y peor CMJ medio semanal en cada una de las temporadas	77
6.9	Evolución de la intensidad (%VAM) media semanal de las 4 semanas previas al mejor y peor CMJ medio semanal en cada una de las temporadas	78

6.10	Evolución del porcentaje de pérdida de CMJ medio semanal de cada sesión de las 4 semanas previas al mejor y peor CMJ medio semanal	79
-------------	--	-----------

Anexos

14.ANEXOS

Anexo 1.

Consentimiento informado **Estudio Preliminar**

CONSENTIMIENTO INFORMADO

D. _____, mayor de edad, con D.N.I. _____, actuando en nombre propio,

DECLARO:

Que he sido informado por el Dr. Juan José González Badillo sobre las posibles consecuencias de la realización de los tests físicos de valoración de la velocidad aeróbica máxima, del salto vertical pre y post esfuerzo, la FC durante el esfuerzo y la concentración sanguínea de lactato así como de los riesgos potenciales y molestias que podrían derivarse de los mismos, a la vez que he podido realizar todas las preguntas que he considerado necesarias, respondiéndome a todas ellas de manera comprensible para mí.

También me ha informado de mi derecho a rechazar el tratamiento o revocar este consentimiento.

Por lo tanto, CONSIENTO en someterme a los protocolos indicados.

Si mi participación puede ser de utilidad científica y para tal fin se publican artículos científicos, autorizo la utilización de los datos reportados durante mis pruebas siempre y cuando se me garantice el más absoluto respeto a mi intimidad y anonimato.

Firma del sujeto

Firma del responsable del estudio

En Sevilla, a ____ de _____ de 20 ____

Anexo 2.

Consentimiento informado **Estudio Principal**

CONSENTIMIENTO INFORMADO

D. _____, mayor de edad, con D.N.I. _____, actuando en nombre propio,

DECLARO:

Que he sido informado por el Dr. Juan José González Badillo sobre las posibles consecuencias de la realización de los tests físicos consistentes en la medición del salto vertical antes y después de cada entrenamiento, la medición de la FC durante las sesiones y la valoración de la fuerza (sentadilla y saltos con carga), velocidad (20 m), la velocidad aeróbica máxima y la potencia anaeróbica (300 m) además de la concentración de lactato sanguíneo, así como de los riesgos potenciales y molestias que podrían derivarse de los mismos, a la vez que he podido realizar todas las preguntas que he considerado necesarias, respondiéndome a todas ellas de manera comprensible para mí.

También me ha informado de mi derecho a rechazar el tratamiento o revocar este consentimiento.

Por lo tanto, CONSIENTO en someterme a los protocolos indicados.

Si mi participación puede ser de utilidad científica y para tal fin se publican artículos científicos, autorizo la utilización de los datos reportados durante mis pruebas siempre y cuando se me garantice el más absoluto respeto a mi intimidad y anonimato.

Firma del sujeto

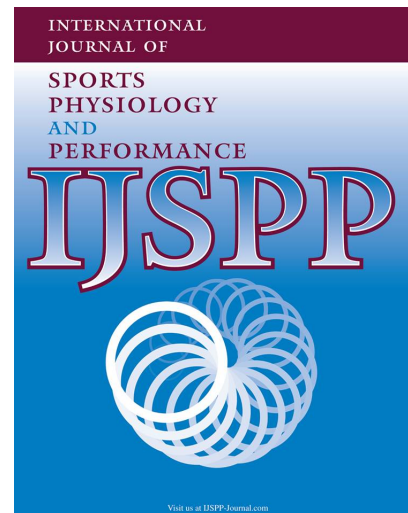
Firma del responsable del estudio

En Sevilla, a ____ de _____ de 20__

Anexo 3.

Publicaciones Científicas y Divulgación de los Resultados

Editor International Journal of
Sports Physiology and
Performance



j.j.de.koning@vu.nl

Sep 23rd, 2020

To whom it may concern,

I can confirm that the manuscript "Load index and vertical jump to monitor neuromuscular fatigue in an elite 800 meter athlete" (Manuscript ID IJSPP.2020-0474.R2) by Marco-Contreras, Bachero-Mena, Rodríguez-Rosell and González-Badillohas has been accepted for publication in IJSPP.

Kind regards,
Dr. Jos J. de Koning

Editor International Journal of Sports Physiology and Performance

Load Index and Vertical Jump to Monitor Neuromuscular Fatigue in an Elite 800-m Athlete

Luis A. Marco-Contreras, Beatriz Bachero-Mena, David Rodríguez-Rosell,
and Juan J. González-Badillo

Purpose: To analyze the relationships between the evolution of training-load values and countermovement jump (CMJ) as an indicator of stress and fatigue in a high-level 800-m runner during a whole season, including indoor (ID) and outdoor season (OD). **Methods:** Over 42 weeks, daily training load was quantified as the result of the product of the intensity and volume, and it was termed load index (LI). CMJ was measured in every running session after warm-up and immediately after the last effort of the session. Other jump-related variables such as CMJ height loss, average weekly CMJ, initial CMJ of the next consecutive session, and initial CMJ of the following week were studied. **Results:** A significant negative relationship was observed between LI and weekly CMJ (ID: $r = -.68$, $P < .001$, common variance [CV] = 46%; OD: $r = -.73$, $P < .001$, CV = 53%), initial CMJ of the following week (OD: $r = -.71$, $P < .01$, CV = 50%), and CMJ height loss (ID: $r = -.58$, $P < .01$, CV = 34%; OD: $r = -.52$, $P < .01$, CV = 27%). A significant positive relationship was observed between LI and initial CMJ of the next consecutive session when LI values were < 8 (OD: $r = .72$; $P < .01$, CV = 52%). However, from values ≥ 8 , the relationship turned into a significant negative one (ID: $r = -.74$; $P < .01$, CV = 55%; OD: $r = -.64$, $P < .01$, CV = 41%). **Conclusions:** CMJ may be a valid indicator of the degree of stress or fatigue generated by specific training sessions of a competitive athlete within a single session, a week, or even the following week. There could be an individual limit LI value from which the training volume does not allow a positive effect on high-speed actions such as a CMJ in the next consecutive session.

Keywords: middle-distance running, dose response, training load, countermovement jump

Training for the 800-m run entails a big challenge to middle-distance coaches, probably due to the complexity of the event, as a variety of factors are related to performance over this distance. Performance in middle-distance events is characterized by both aerobic and anaerobic system contribution,^{1,2} together with other factors such as biomechanics, muscle strength, and speed,^{3,4} with the challenge being to run at high velocities while still maintaining economical movement. In addition, in the last decade, a changing on the run strategy has been observed during the men's championship 800-m event, showing predominantly a "gun-to-tape" type race tactic in the finals, which means running at a high pace from the start of the race to the end.⁵

Given the complexity of performance determinants in this type of event, monitoring athletes' training load is essential for understanding individual responses to training, assessing fatigue and recovery, and minimizing the risk of nonfunctional overreaching or injury.^{6,7} Vertical jump tests have been widely proposed as an efficient and immediate assessment tool for lower limbs explosive strength,⁸ as well as to monitor neuromuscular fatigue response to training load for optimizing performance.^{9,10} The countermovement jump (CMJ) test is one of the most common jump tests used because of its validity, reliability, and specificity.^{10,11} Previous studies have shown high relationships between CMJ height loss and blood lactate and ammonia concentrations during typical training sessions in 400-m elite athletes¹² and sprinters,^{13,14} supporting the use of jump height for monitoring the fatigue induced during training sessions.

According to previous studies, it is likely to be relationships between training loads and vertical jump performance. These relationships could provide relevant information in order to adjust optimal individual load and to evaluate fatigue and recovery during training in elite 800-m runners. Therefore, the purpose of this study was to analyze the relationship between training load and the evolution of CMJ as an indicator of stress and neuromuscular fatigue in a high-level 800-m runner during a whole season.

Methods

The 800-m runner was 28 years old, 1.84-m tall and weighed 72.1 kg at the beginning of the study. He had been competing at a high level for more than 8 years and had competed in the London 2012 Olympic Games, where he finished 18th. He had also participated in 5 World Championships and in 8 European Championships including indoor (ID) and outdoor seasons. He won a silver medal in the 800 m at the European Indoor Championships in 2009.

During the 10-month follow-up of the study, all the training sessions carried out by the athlete were recorded. Training load was quantified as the result of the product of the intensity (percentage of the maximal aerobic speed [MAS]) and the volume (running distance) in each training session. The result of this product is hereinafter referred to as "load index (LI)." MAS was measured 3 times (preseason, midseason, and final season) through a treadmill MAS test, which consisted in a continuous incremental effort, starting at 8 km·h⁻¹ and progressively increasing speed by 0.5 km·h⁻¹·min⁻¹ with a 1% grade. Last speed that athlete reached was considered the MAS. The athlete performed a strength-training program twice a week (72 h apart) in addition to the running sessions. This strength training program consisted mostly of full squat, squat jump, and jump exercises with moderate loads (50–65

Marco-Contreras is with the Universidad San Jorge, Zaragoza, Spain. Marco-Contreras, Rodríguez-Rosell, and González-Badillo are with the Physical Performance & Sports Research Center, Universidad Pablo de Olavide, Seville, Spain. Bachero-Mena is with the Dept of Physical Education and Sport, University of Seville, Seville, Spain. Marco-Contreras (lamarco@usj.es) is corresponding author.

percentage 1-repetition maximum) and low volume (2–3 sets of 3–8 repetitions), each repetition always being performed at maximal intended velocity. The strength training sessions were not included for analysis. CMJ was measured before and immediately after each training session (127 sessions in total). CMJ height was calculated from flight time on an Ergojump contact platform (Boscosystem, Barcelona, Spain). Before the initial jump, a standardized warm-up was performed according to the usual routine of 800-m runners: 10 to 15 minute at a self-selected easy pace, 5 minute of joint mobilization exercises, and 3 to 4 sprints of 50- to 80-m distance at 80% to 90% of perceived effort, with 2-minute rest periods between them. Thereafter, a specific warm-up was carried for the initial CMJ measurement: 10 squats without an external load, 5 CMJ at progressive intensity, and 3 maximal CMJ. The CMJ was performed with both hands on the waist, while performing a downward movement until about 90° of knee flexion followed by a maximal vertical jump. The athlete was highly familiarized with the CMJ exercise. The athlete performed 3 maximal CMJ at the beginning of each training session (separated by 30-s rest) and 3 maximal CMJ (separated by 5-s rest) immediately after each training session (<45 s from the last running bout). The average value of the 3 jumps was used for the subsequent statistical analysis. In order to quantify the fatigue induced by the training session, the percentage of change in CMJ height experienced after each training session with respect to the CMJ at the beginning of each training session value of the same training session was calculated and expressed as CMJ height loss (CMJloss). Other jump-related variables studied were as follows: initial average weekly CMJ (CMJweek), initial CMJ of the following week (CMJfw), and initial CMJ of the next consecutive session (CMJ24h). These variables were used to study the relationship of the training load with the vertical jump measured at different times. The athlete gave written informed consent for publication of the results of this study.

Data are presented as mean (SD). Pearson correlation coefficients (r) with 95% confidence interval were used to calculate the

relationships between variables. Partial correlation was applied to control the possible effect of third variables when deemed necessary. The analyses were performed using the SPSS statistical package (SPSS Inc, Chicago, IL). Statistical significance was set at $P < .05$.

Results

The LI showed a significant negative relationship with training intensity ($r = -.86$, $P < .001$, common variance = 74%) and a high significant positive relationship with volume ($r = .99$, $P < .001$, common variance = 98%).

Weekly evolution of the LI, intensity, and CMJweek throughout the season are presented in Figure 1. There was a gradual and almost parallel increase in both CMJweek and intensity, while LI showed a tendency to decrease. The same tendency was observed for both ID and OD, with the CMJweek values slightly increased during the outdoor (Figure 1).

Table 1 shows the relationships among the different jump variables, LI, and training intensity. A significant negative relationship was observed between average weekly LI and CMJweek (ID and OD). Similarly, a significant negative relationship was also observed between LI and CMJfw. Conversely, training intensity showed a significant positive relationship with CMJweek (ID and OD) and CMJfw. Moreover, a significant negative relationship was observed between LI and CMJloss within the session. Interestingly, when the correlation between LI and CMJloss was controlled for CMJ at the beginning of each training session, the correlation coefficient values remained practically stable (ID: $r = -.521$, $P < .001$; OD: $r = -.440$, $P < .01$).

During OD, a significant positive relationship was observed between LI and the CMJ24h when LI values were < 8 ($r = .72$; $P < .01$; Figure 2B). From values ≥ 8 , the relationship turned into significant negative ($r = -.64$; $P < .01$; Figure 2C), similar to that described for the ID season ($r = -.74$; $P < .001$; Figure 2A).

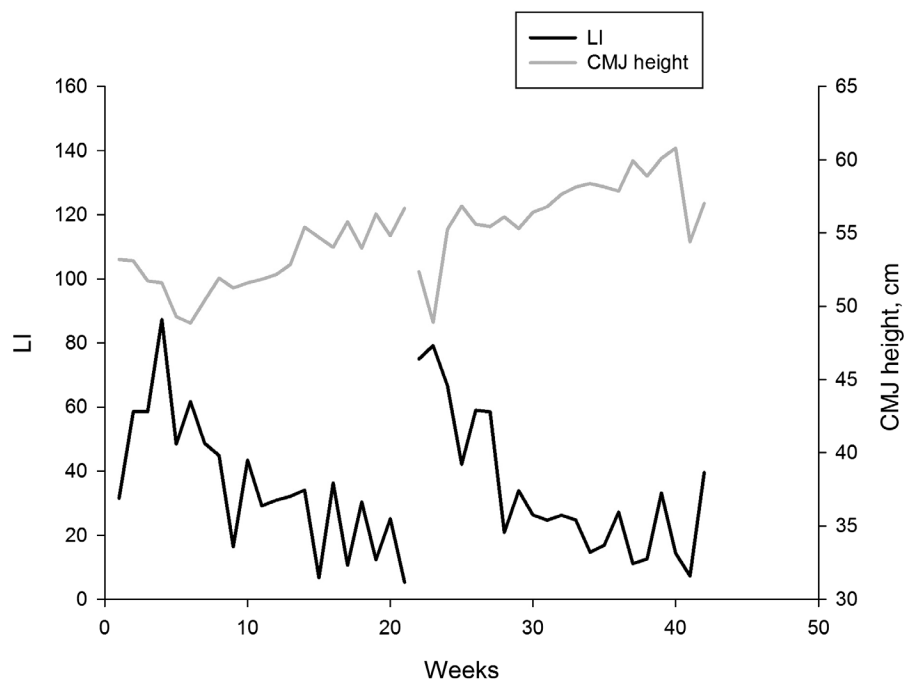


Figure 1 — Weekly evolution of the LI and initial average weekly CMJ (CMJweek) throughout the season (indoor and outdoor). CMJ indicates countermovement jump; LI, load index.

Table 1 Relationship [95% Confidence Interval] Between LI, Training Intensity (INT), and Different CMJ Variables Assessed During ID and OD Season

Variable	LI (ID)	LI (OD)	INT (ID)	INT (OD)	LIsess	INTsess
CMJweek	-.68 [-.34 to -.86]*** (46%)	-.73 [-.44 to -.89]*** (53%)	.80 [.57 to .92]*** (64%)	.71 [.41 to .88]*** (50%)		
CMJfw	-.49 [-.01 to -.79]† (24%)	-.71 [-.35 to -.89]** (50%)	.75 [.41 to .91]** (56%)	.72 [.37 to .89]** (52%)		
CMJloss (ID)					-.58 [-.37 to -.73]** (34%)	.61 [.42 to .76]** (37%)
CMJloss (OD)					-.52 [-.30 to -.69]** (27%)	.51 [.29 to .68]** (26%)
CMJ24h (ID)					-.74 [-.26 to -.92]** (55%)	.74 [.26 to .92]** (55%)
CMJ24h (OD) (LI < 8)					.72 [.41 to .88]*** (52%)	-.75 [-.47 to -.89]*** (56%)
CMJ24h (OD) (LI ≥ 8)					-.64 [-.01 to -.90]** (41%)	.68 [.14 to .91]* (46%)

Abbreviations: CMJ, countermovement jump; ID, indoor season; INT, training intensity; LI, load index; OD, outdoor season; LIsess, session LI; INTsess, session INT; CMJweek, initial average weekly CMJ; CMJfw, initial CMJ of the following week; CMJloss, percentage of change in CMJ height pre-post session; CMJ24h, initial CMJ of the next consecutive session. Note: The numbers in parentheses are the percentage common variance ($R^2 \times 100$).

Significant relationship: * $P < .05$, ** $P < 0.01$, *** $P < .001$.

†Almost significant relationship ($P = .054$).

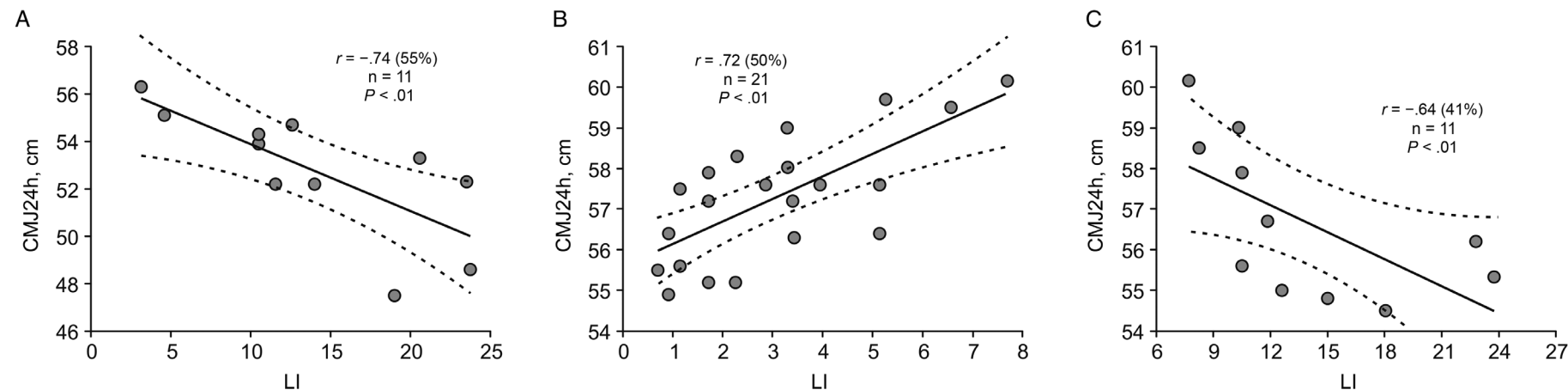


Figure 2 — Relationship between initial CMJ of the next consecutive session (CMJ24h) and the LI during indoor season (A), with LI values <8 during outdoor season (B) and with LI values ≥8 during outdoor season (C). Dashed lines represent the 95% confidence interval and the numbers in parentheses are the percentage common variance ($R^2 \times 100$). CMJ indicates countermovement jump; LI, load index.

Discussion

This research provides an overview of the training of an elite 800 runner. For this, the relationships between training load and the evolution of CMJ as an indicator of stress and fatigue were analyzed. The weekly evolution of the CMJ and the intensity (percentage of the maximal aerobic speed) throughout the 2 seasons (ID and OD) showed a tendency to increase as the LI decreased (Figure 1). Similar results were observed in previous studies in runners of the same discipline^{3,15,16} and in sprinters.¹⁰

The use of jump height for monitoring the fatigue induced in training sessions has been previously reported.^{12–14} However, this is the first study analyzing the evolution of the CMJ in all the running sessions during a whole season (42 wk). In our study, a significant negative relationship was observed between the LI and the different jump variables (Table 1). These results suggest that the LI could be a valid predictor of the degree of fatigue, and that the CMJ is a good indicator of the training load magnitude. In this line, as previously reported,^{12–14} higher CMJ loss values in the session were consequence of higher intensity and lower LI sessions. On the other hand, the intensity showed a significant positive relationship with all the jump variables analyzed, which is consistent with the significant negative relationship between the intensity and LI.

Concerning the relationships between the LI values and CMJ24h, an interesting result was observed during the OD, as a significant positive relationship was observed between these variables when LI values were <8, whereas this relationship turned into negative when LI values were ≥8 (Figure 2B, 2C). These results suggest that: (1) there could be an individual limit LI value (8 in our case) from which the training volume used does not allow a positive effect on high-speed actions, such as a CMJ in the next consecutive session, and (2) the degree of fatigue generated by sessions with a LI lower than 8 (which correspond to high-intensity and low-volume sessions), tended to produce an increased jumping capacity in the next consecutive session (24–48 h later), despite the fact that training sessions with lower LI and greater training intensity produce a greater CMJ loss within the session. This fact could be related to the high activation of the fast fibers during training sessions with high-training intensity, which produces greater acute degree of fatigue. However, based on our results, it could be a positive stimulus for improving fast actions such as vertical jump performance on the next 24 to 48 hours. In this line, some authors¹⁷ have described the need of a low-volume and high-intensity training in the tapering phase prior to a competition, supporting that training intensity is a key factor to maintain and enhance physiological and performance adaptations during the taper.

Obviously, our study presents some limitations that need to be addressed. First, results of the present study belong to a single athlete, so studies including a greater number of participants are necessary to confirm the relevance of vertical jump and LI as non-invasive indicators of the degree of fatigue induced during running training. Second, although the findings of the present study could be applicable to many athletes, the individual response could be different depending on the characteristics of each athlete and sport modality.

Practical Applications

Monitoring vertical jump capacity could help coaches to estimate the degree of fatigue generated by the applied load and its effect

within a single session (CMJloss), 24 hours later (CMJ24h), or even the following week (CMJfw).

Conclusions

The results of our study reinforce the use of the CMJ for monitoring the training load and the degree of fatigue induced by specific training sessions of a competitive athlete within a single session, a week, or even the following week. Moreover, these results also seem to indicate that there could be an individual limit LI value from which the jump capacity at 24 to 48 hours is compromised.

References

- Hill DW. Energy system contributions in middle-distance running events. *J Sports Sci.* 1999;17(6):477–483. PubMed ID: 10404496 doi:10.1080/026404199365786
- Spencer MR, Gastin PB. Energy system contribution during 200- to 1500-m running in highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33(1):157–162. PubMed ID: 11194103 doi:10.1097/00005768-200101000-00024
- Bachero-Mena B, Pareja-Blanco F, Rodriguez-Rosell D, Yanez-Garcia JM, Mora-Custodio R, Gonzalez-Badillo JJ. Relationships between sprint, jumping and strength abilities, and 800 m performance in male athletes of national and international levels. *J Hum Kinet.* 2017;58(1):187–195. PubMed ID: 28828089 doi:10.1515/hukin-2017-0076
- Sandford GN, Allen SV, Kilding AE, Ross A, Laursen PB. Anaerobic speed reserve: a key component of elite male 800-m running. *Int J Sports Physiol Perform.* 2019;14(4):501–508. PubMed ID: 30300023 doi:10.1123/ijsp.2018-0163
- Sandford G, Pearson S, Allen S, et al. Tactical behaviours in men's 800 m Olympic and World Championship medallists: a changing of the guard. *Int J Sports Physiol Perform.* 2018;13(2):246–249. PubMed ID: 28488905 doi:10.1123/ijsp.2016-0780
- Mujika I. Quantification of training and completion loads in endurance sports: methods and applications. *Int J Sports Physiol Perf.* 2017;12(suppl 2):S2–9–S2–17. doi:10.1123/ijsp.2016-0403
- Bourdon PC, Cardinale M, Murray A, et al. Monitoring athlete training loads: consensus statement. *Int J Sports Physiol Perform.* 2017;12(suppl 2):S2161–S2170.
- Cormie P., McBride JM, McGauley GO. Power-time, force-time, and velocity time curve analysis of the countermovement jump: impact of training. *J Strength Cond Res.* 2009;23(1):177–186. PubMed ID: 19077740 doi:10.1519/JSC.0b013e3181889324
- Claudino JG, Cronin J, Mezêncio B, et al. The countermovement jump to monitor neuromuscular status: a meta-analysis. *J Sci Med Sport.* 2016;20(4):397–402. PubMed ID: 27663764 doi:10.1016/j.jsams.2016.08.011
- Jiménez-Reyes P, González-Badillo JJ. Monitoring training load through the CMJ in sprints and jump events for optimizing performance in athletics. *Cult Ciencia Deporte.* 2011;6(18):207–217. doi:10.12800/ccd.v6i18.48
- Gathercole RJ, Sporer BC, Stellingwerff T, Sleivert GG. Comparison of the capacity of different jump and sprint field tests to detect neuromuscular fatigue. *J Strength Cond Res.* 2015;29(9):2522–2531. PubMed ID: 26308829 doi:10.1519/JSC.0000000000000912
- Gorostiaga EM, Asiain X, Izquierdo M, et al. Vertical jump performance and blood ammonia and lactate levels during typical training sessions in elite 400-m runners. *J Strength Cond Res.* 2010;24(4):

- 1138–1149. PubMed ID: [20300013](#) doi:[10.1519/JSC.0b013e3181cf769f](#)
13. Jimenez-Reyes P, Pareja-Blanco F, Cuadrado-Peñafiel V, Morcillo JA, Párraga JA, González-Badillo JJ. Mechanical, metabolic and perceptual response during sprint training. *Int J Sports Med.* 2016;37(10):807–812. PubMed ID: [27286181](#) doi:[10.1055/s-0042-107251](#)
 14. Jiménez-Reyes P, Pareja-Blanco F, Cuadrado-Peñafiel V, Ortega-Becerra M, Párraga J, González-Badillo JJ. Jump height loss as an indicator of fatigue during sprint training. *J Sports Sci.* 2019; 37(9):1029–1037. PubMed ID: [30380362](#) doi:[10.1080/02640414.2018.1539445](#)
 15. Bachero-Mena B, Pareja-Blanco F, González-Badillo JJ. Enhanced strength and sprint levels, and changes in blood parameters during a complete athletics season in 800 m high-level athletes. *Front Physiol.* 2017;8:637. PubMed ID: [28912725](#) doi:[10.3389/fphys.2017.00637](#)
 16. Balsalobre-Fernández C, Tejero-González CM, del Campo-Vecino J. Relationships between training load, salivary cortisol responses and performance during season training in middle and long distance runners. *PLoS One.* 2014;9(8):e106066. PubMed ID: [25153137](#) doi:[10.1371/journal.pone.0106066](#)
 17. Mujika I. Intense training: the key to optimal performance before and during the taper. *Scand J Med Sci Sports.* 2010;20(2):24–31. doi:[10.1111/j.1600-0838.2010.01189.x](#)

IX INTERNATIONAL SYMPOSIUM IN STRENGTH TRAINING


We certify that

Marco-Contreras, L.A., Rodríguez-Rossel, D., Bachero-Mena, B. González-Badillo, J.J. have presented the Poster entitled: "Training load and vertical jump evolution during a full season in a high level 800m-runner.", at the IX International Symposium in Strength Training held in Faculty of Physical Activity and Sports Sciences (INEF), Technical University of Madrid, Madrid (Spain) from 16 to 17 December 2016.

Madrid, 17th December 2016.



Pedro J. Benito Peinado
President of the
Organizing Committee



Ana B. Peinado Lozano
President of the
Scientific Committee

Technical University of Madrid and National Strength and Conditioning Association (NSCA Spain), organizers of the

"XII INTERNATIONAL SYMPOSIUM IN STRENGTH TRAINING & IronFEMME STUDY/ I NSCA SPAIN NATIONAL CONFERENCE"

are pleased to grant the

**Special Award WOMEN AND SPORT RESEARCH
for the best Oral Communication to**

"Comparison of maximal aerobic speed obtained in a treadmill or a track test in middle-distance women runners"

by Marco-Contreras, L.A., Bachero-Mena, B., González-Badillo. J.J.

Madrid, 14th December 2019



Pedro J. Benito Peinado

Presidente del Comité Organizador



Ana Belén Peinado Lozano

Presidenta del Comité Científico



25TH ANNIVERSARY CONGRESS

OCTOBER 28-30, 2020

EUROPEAN COLLEGE OF SPORT SCIENCE

Aachener Str. 1053 -1055
50858 Cologne

GERMANY

VAT-ID: DE251715668 - St.Nr.: 223/5905/0216

register of associations: VR12508

Cologne, 11.12.2020 - 10:26:21

Confirmation of Presentation

This is to certify that the following title has been presented at the 25th Annual Congress of the European College of Sport Science between 28 - 30 October 2020.

Luis Alberto Marco-Contreras

Universidad San Jorge. Zaragoza
C/ Julián Ribera, 26
50010 Zaragoza, Spain

Abstr.-ID: 2615, Presentation format: CP-poster , Session name: CP-AP05 - Training and testing

Title: Analysis of the maximal speed obtained in a incremental test in middle-distance men runners of national and international level over two different surfaces: a motorised treadmill and athletic track te

Authors: Marco-Contreras, L.A.1,3, Bachero-Mena, B.2, González-Badillo, J.J.3

Institution: Universidad San Jorge. Campus Universitario, Autov. A23 km 299, 50830. Villanueva de Gállego Zaragoza.

Presentation date: 29.10.2020, 17:45, Lecture room: Virtual 24h, No: 5

European College of Sport Science

This document has been created digitally and is valid without a signature

Privacy Policy (<http://sport-science.org/index.php/privacy-policy>) - Terms & Conditions (<http://ecss-congress.eu/2020/20/index.php/terms-conditions>)

Copyright © 2020 European College of Sport Science, All Rights Reserved.
The ECSS is a non profit organisation, dedicated to Sport Science.